



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

# Tracing Dark Matter Halo Mass Using Central Velocity Dispersion of Galaxies

은하의 중심 속도 분산을 이용한 암흑 물질 헤일로  
의 질량 추적

2019년 8월

서울대학교 대학원  
물리·천문학부 천문학전공  
서 강 일



# Tracing Dark Matter Halo Mass Using Central Velocity Dispersion of Galaxies

은하의 중심 속도 분산을 이용한 암흑 물질 헤일로  
의 질량 추적

지도교수 이 명 균

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

2019년 4월

서울대학교 대학원

물리·천문학부 천문학전공

서 강 일

서 강 일의 이학석사 학위논문을 인준함

2019년 6월

위 원 장

임 명 신

부 위 원 장

이 명 균

위 원

김 응 태



# Tracing Dark Matter Halo Mass Using Central Velocity Dispersion of Galaxies

by

Gang-Il Seo  
(giseo@astro.snu.ac.kr)

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for  
the degree of

**Master of Science**

in

Astronomy

in

Astronomy Program

Department of Physics and Astronomy

Seoul National University

Committee:

Professor      Myungshin Im

Professor      Myung Gyoon Lee

Professor      Woong-Tae Kim



# ABSTRACT

은하 질량의 대부분은 암흑물질이 차지하고 있다고 알려져있다. 그러나 은하에 있는 암흑물질의 질량과 분포범위는 관측적으로 측정하기 어렵다. 최근에 은하의 중심부에 있는 별의 속도분산이 암흑물질헤일로 질량을 측정할 수 있는 방법이라고 제시되었다. 본 연구에서는 위성 은하의 운동학적 특성을 이용하여 이 가설을 검증하는 연구를 수행하였다. 은하 주변 위성 은하의 속도 분산을 구하고, 이로부터 중심은하의 역학적 질량을 계산하였다. 이 질량과 은하의 중심부 별 속도 분산 사이의 상관 관계를 조사하였다. 슬로온 디지털 전천 탐사 (Sloan Digital Sky Survey)의 12번째 공개 자료 (Data Release 12)에 있는 은하의 분광 표본에 Friends-of-Friends 알고리즘을 적용하여, 위성은하를 가진 은하의 목록을 작성하였다. 각 은하에 있는 위성은하의 수가 적으므로, 통계적 신뢰도를 높이기 위해, 물리량이 비슷한 은하를 합쳐서 은하의 물리적 특성을 측정하였다. 중심 은하의 별 속도 분산은 위성 은하의 속도 분산과 선형적으로 비례한다. 또한 중심 은하의 별 속도 분산은 은하의 역학적질량과 강한 상관관계를 보이며 이는 멱함수로 기술할 수 있다. 조기형 은하와 만기형 은하 모두 이러한 상관관계를 보여준다. 기존 연구에서는 중심 은하의 광도 또는 항성질량을 이용하여 은하의 암흑 물질 헤일로 질량을 추정하였다. 본 연구 결과는 중심 은하의 속도 분산도 암흑 물질의 헤일로 질량을 효율적으로 추정할 수 있는 방법임을 보여준다. 앞으로 분광 탐사 연구를 통해 많은 은하에 대하여 중심속도 분산을 구하게 되면, 이를 이용하여 암흑 물질 헤일로 특성을 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** dark matter halo, galaxies, galaxy kinematics, satellite galaxies

**Student Number:** 2017-27219





# Contents

|   |     |
|---|-----|
| 초록  | i   |
| List of Figures                             | xi  |
| List of Tables                              | xiv |
| 1 서론  | 1   |
| 2 자료와 자료 분석                                 | 5   |
| 2.1 SDSS DR12 은하 목록                         | 5   |
| 2.2 분광 관측 자료                                | 6   |
| 2.2.1 $D_n4000$                             | 7   |
| 2.2.2 별 속도 분산 (Stellar velocity dispersion) | 8   |
| 2.3 고립된 은하 목록                               | 10  |
| 2.4 분광 관측 완결성 (completeness)                | 13  |
| 2.5 표본 은하의 분류                               | 17  |
| 2.5.1 $(g-r)_0$ 색을 이용한 은하 분류                | 17  |
| 2.5.2 $D_n4000$ 을 이용한 은하 분류                 | 19  |
| 2.5.3 모은하의 형태 분류                            | 20  |
| 3 결과  | 25  |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.1      | 위성 은하의 속도 분산 계산( $\sigma_{\text{sat}}$ ) . . . . . | 25        |
| 3.1.1    | 가우스함수 맞추기 . . . . .                                | 30        |
| 3.1.2    | 속도 분포의 표준 편차 . . . . .                             | 30        |
| 3.1.3    | Biweight 방법 . . . . .                              | 31        |
| 3.2      | 위성 은하의 속도 분산과 모은하로부터의 거리의 관계 . . . . .             | 31        |
| 3.2.1    | 모든 중심 은하 . . . . .                                 | 31        |
| 3.2.2    | 조건에 따른 모은하 부표본의 결과 . . . . .                       | 32        |
| 3.3      | 위성 은하의 속도 분산과 모은하의 절대 등급의 관계 . . . . .             | 35        |
| 3.3.1    | 모든 중심 은하 . . . . .                                 | 36        |
| 3.3.2    | 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과 . . . . .                      | 37        |
| 3.4      | 위성 은하의 속도 분산과 모은하의 항성 질량의 관계 . . . . .             | 40        |
| 3.4.1    | 모든 중심 은하 . . . . .                                 | 41        |
| 3.4.2    | 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과 . . . . .                      | 42        |
| 3.5      | 위성 은하의 속도 분산과 모은하의 중심 속도 분산의 관계 . . . . .          | 45        |
| 3.5.1    | 모든 중심 은하 . . . . .                                 | 45        |
| 3.5.2    | 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과 . . . . .                      | 47        |
| <b>4</b> | <b>토의</b>  | <b>55</b> |
| 4.1      | 세 가지 $\sigma_{\text{sat}}$ 결과 . . . . .            | 55        |
| 4.2      | 위성 은하의 속도 분산과 모은하 물리량의 상관 관계 . . . . .             | 59        |
| 4.2.1    | 중심 은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산의 관계 . . . . .           | 59        |
| 4.2.2    | 항성 질량과 위성 은하의 속도 분산의 관계 . . . . .                  | 60        |
| 4.3      | 시뮬레이션 결과와의 비교 . . . . .                            | 62        |
| 4.3.1    | 모든 모은하 표본을 사용한 역학적 질량과 중심 속도 분산의 관계 . . . . .      | 64        |
| 4.3.2    | 모은하 부 표본으로 살펴본 역학적 질량과 중심 속도 분산의 관계 . . . . .      | 66        |
| <b>5</b> | <b>결론 및 요약</b>                                     | <b>73</b> |

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>Bibliography</b> | <b>77</b> |
| <b>Abstract</b>     | <b>81</b> |



# List of Figures

- 2.1 중심 은하의 Portsmouth 별 속도 분산과 SDSS pipeline의 속도 분산 결과 비교. x축은 Portsmouth의 속도 분산 (Thomas et al. 2013), y축은 SDSS의 pipeline에서 계산된 속도 분산을 나타낸다. 회색의 파선은  $\sigma_{SDSS}$ 와  $\sigma_{Portsmouth}$ 의 1대 1 비례 관계에 해당하는 선이다. 회색 영역은  $\sigma_{Portsmouth}$ 의 일반적인 측정 오차값인 14%에 해당하는 범위이다 (Thomas et al. 2013). 14%의 오차 범위를 벗어나는 은하들은 중심 별 속도분산이 잘못 측정되었을 가능성이 높기 때문에 표본에서 제외한다. . . . . 9
- 2.2 (a) 위상 공간 (phase-space)에서 은하 표본에 속한 위성 은하들의 분포. 가로 축은 중심 은하로부터 측정된 천구 상의 투영된 거리 (projected distance), 세로 축은 중심 은하와의 상대적인 시선 방향 속도 차이를 보여준다. 각 은하계의 중심 은하들은 그림의 (0,0)에 위치하여 표시하지 않았다. (b) 위성 은하들의 중심 은하로부터 천구상에 투영된 거리의 분포. (c) 위성 은하와 중심 은하와의 상대적인 시선 방향 속도 차이 분포. . . . . 12
- 2.3 중심 은하를 기준으로 하여 각거리 간격마다 고리로 영역을 설정하였다. 설정한 영역 내에 측광이 수행된 모든 은하들 중 분광 관측이 수행된 은하들의 비율을 계산한 결과이다. 각거리는 우리가 관측적으로 파악할 수 있는 물리량이기 때문에 실제 투영된 거리가 아닌 각거리를 기준으로 분광 관측의 완결성을 분석하였다. . . . . 14

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.4  | 중심 은하의 적색 이동에 따른 분광 관측의 완결성을 분석한 결과이다. 중심 은하의 적색 이동 값을 일정 구간으로 나누었다. 일정 구간에 속한 중심 은하 주변의 위성 은하들에 대해 측광 결과가 있는 은하 중 분광 자료가 있는 은하의 비율로 $y$ 축 값을 계산하였다. . . . .   | 15 |
| 2.5  | 중심 은하의 안시 등급에 따른 분광 관측의 완결성. 중심 은하의 안시 등급 값에 따라 $m_r < 17.77$ 인 위성 은하들에 대해 측광 결과가 있는 은하들 중 분광 자료가 있는 은하들의 비율로 $y$ 축 값을 계산하였다. 우리가 선별한 표본의 분광 관측 완결성에 대해 전체적인 문제가 있지 않다고 검증하였다.   | 16 |
| 2.6  | 모은하 표본의 색-등급도. 가로 축은 cModel 등급으로 계산한 $r$ -band 절대 등급, 세로 축은 model 등급으로 계산한 $(g - r)_0$ 색을 나타낸다. 우리는 $(g - r)_0 = 0.85$ 를 기준으로 하여 적색 모은하와 청색 모은하를 구분하였다.  | 18 |
| 2.7  | 중심 은하들의 $D_n4000$ 과 $g - r$ 색 분포도. 수평한 점선은 별 형성이 멈춘 은하를 고르기 위해 적용한 기준인 $D_n4000 = 1.6$ 을 보여준다. 수직한 점선은 그림 2.6에 적용한 $(g - r)_0 = 0.85$ 를 나타내었다. 빨간색 점들은 색-등급도를 이용해 골라낸 적색은하를, 파란색 점들은 청색은하를 보여준다. 우측 히스토그램의 회색 선은 모든 모은하 표본에 대한 $D_n4000$ 값의 분포를 나타내고 있다. . . . . | 19 |
| 2.8  | 모든 모은하 표본들에 대한 조기형 은하와 만기형 은하의 분포 그래프. 각 모은하의 형태 분류는 Choi et al. (2010)의 결과를 사용하였다. 파란색은 나선 은하, 그리고 적색색은 타원 은하의 모양을 의미하며, 초록색으로 표기된 점은 각 구간에서 전체 은하들 중 타원 은하의 개수 비율을 의미한다.   | 21 |
| 2.9  | 색-등급도에서 $(g - r)_0 > 0.85$ 조건을 만족하는 적색 모은하 부표본에 대한 형태 분류 결과. . . . .   | 22 |
| 2.10 | $D_n4000 \geq 1.6$ 인 모은하들의 형태 분류 . . . . .   | 23 |
| 2.11 | 별 형성이 멈춘 ( $D_n4000 \geq 1.6$ ) 적색 ( $(g - r)_0 > 0.85$ ) 모은하 표본에 대한 결과이다. . . . .   | 24 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | 모든 모은하들에 대한 위성 은하 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하로부터의 거리<br>의 관계. . . . .  | 32 |
| 3.2  | 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과 . . . . .  | 33 |
| 3.3  | 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과 . . . . .  | 33 |
| 3.4  | 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과 . .  | 34 |
| 3.5  | 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과   | 34 |
| 3.6  | 모든 모은하들에 대해 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하의 r-band<br>절대 등급의 관계. . . . .   | 36 |
| 3.7  | 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과. . . . .   | 37 |
| 3.8  | 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과. . . . .   | 38 |
| 3.9  | 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과. .   | 39 |
| 3.10 | 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본<br>결과. . . . .   | 40 |
| 3.11 | 모든 모은하들에 대해 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하의 항성 질량<br>의 관계. . . . .   | 41 |
| 3.12 | 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과. . . . .  | 42 |
| 3.13 | 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과.  | 43 |
| 3.14 | 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본<br>결과. . . . .  | 43 |
| 3.15 | 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과. . . . .  | 44 |
| 3.16 | 모든 중심 은하 표본을 이용하여 살펴본 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과<br>중심 은하의 별 속도 분산 ( $\sigma_{*, \text{Prim}(0)}$ )의 관계. . . . . | 45 |
| 3.17 | 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과. . . . .  | 47 |
| 3.18 | 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과. . . . .  | 49 |
| 3.19 | 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과. .  | 50 |



|  |    |
|--|----|
| 3.20 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과. . . . .   | 52 |
| 4.1 표본의 개수가 10개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한 $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위. . . . .  | 56 |
| 4.2 표본의 개수가 100개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한 $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위. . . . .   | 57 |
| 4.3 표본의 개수가 500개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한 $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위. . . . .   | 58 |
| 4.4 중심 은하를 기준으로 하여 천구상 각거리 간격마다 고리로 영역을 설정하였다. 설정한 영역 내에 측광이 수행된 모든 은하들 중 분광 관측이 수행된 은하들의 비율을 계산한 결과이다. 천구상 투영된 각거리는 중심 은하까지의 거리에 중심 은하로부터 떨어진 각거리를 곱하여 계산하였다. 회색과 초록색의 히스토그램은 각각 $\Delta D$ 구간에서 측광 관측과 분광 관측이 수행된 은하들의 개수 분포이다. 푸른색은 초록색 히스토그램과 회색 히스토그램 사이의 비율로 분광 관측 완결성을 나타내고 있다. . . . . | 61 |
| 4.5 모든 모은하에 대한 $M_{200} - M_*$ 의 관계. 푸른색은 속도 분포의 표준 편차의 결과를 나타내며 (Danese et al. 1980), 자주색은 biweight (Beers et al. 1990), 황색은 가우시안 피팅의 결과를 보여준다. 검은색 삼각형은 Wojtak & Mamon (2013)에서 제시하는 항성 질량과 헤일로 질량의 관계를 보여주고 있다. . . . .   | 63 |
| 4.6 모든 중심 은하들에 대해 4.2식을 이용해 $\sigma_{\text{sat}}$ 를 암흑 물질 헤일로의 질량으로 변환한 결과. 주황색 영역은 Zahid et al. (2018)의 그림 5(B)에서 보여주는 은하의 별 속도 분산과 암흑 물질 헤일로의 질량 범위를 나타낸다. 그림 3.16에 표기된 오차 범위를 변환하여 $M_{\text{Halo}}$ 의 최대, 최소 질량으로 범위를 표시하였다. . . . .   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| 4.7 적색 모은하 부표본에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과. . . . .           | 67 |
| 4.8 별 형성이 멈춘 모은하들에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과. .              | 68 |
| 4.9 별 형성이 멈춘 적색 모은하들에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결<br>과. . . . . | 69 |
| 4.10 청색 모은하들에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과. . . . .             | 71 |



# List of Tables

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | 선별된 표본의 숫자 . . . . .  | 11 |
| 2.2 | 조건에 따라 선별되는 모은하 부표본의 숫자 . . . . .   | 24 |
| 3.1 | 모은하 표본의 $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포 . . . . .  | 27 |
| 3.2 | 모은하의 절대 등급 $M_r$ 구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포 . . . . .  | 28 |
| 3.3 | 모은하의 항성 질량 $\log(M_*/M_\odot)$ 구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포 . . . . .  | 29 |
| 3.4 | 모든 모은하 표본에 대해 $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 $\sigma_{\text{sat}}$ 의 결과를 선형 함수에 맞춘 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 a는 모든 샘플을 사용하였다는 뜻의 all을 나타낸다. . . . . | 46 |
| 3.5 | 적색 모은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 r는 $(g - r)_0 > 0.85$ 인 적색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red을 나타낸다. . . . .                             | 47 |
| 3.6 | 청색 모은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 b는 $(g - r)_0 \leq 0.85$ 인 적색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 blue을 나타낸다. . . . .                         | 49 |
| 3.7 | 별 형성이 멈춘 모은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 q는 $D_n4000 \geq 1.6$ 인 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 quiescent를 나타낸다. . . . .                    | 50 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.8 | 별 형성이 멈춘 적색 모은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $r_q$ 는 $D_n4000 \geq 1.6$ 와 $(g - r)_0 > 0.85$ 를 모두 만족하는 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red quiescent를 나타낸다. . . | 52 |
| 4.1 | 모든 모은하 표본에 대해 $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 변환한 $M_{\text{Halo}}$ 의 관계를 선형 함수에 맞춘 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $a$ 는 모든 표본을 사용하였다는 뜻의 all을 나타낸다. . . . .                | 65 |
| 4.2 | 별 형성이 멈춘 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $r$ 는 적색 모은하 표본 사용하였다는 뜻의 red를 나타낸다. . . . .   | 67 |
| 4.3 | 별 형성이 멈춘 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $q$ 는 별 형성이 멈춘 모은하 표본 ( $D_n4000 \geq 1.6$ )을 사용하였다는 뜻의 quiescent를 나타낸다. . . . .                     | 68 |
| 4.4 | 별 형성이 멈춘 적색 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $r \& q$ 는 별 형성이 멈춘 적색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red & quiescent를 나타낸다. . . . .                           | 69 |
| 4.5 | 청색 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 $b$ 는 청색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 blue를 나타낸다.   | 71 |

# Chapter 1

## 서론

현대우주모형에 따르면 은하는 암흑 물질 헤일로 안에서 만들어지고, 오늘날 은하 질량의 대부분은 암흑물질이 차지하고 있다고 알려져있다. 한 은하에서 암흑물질은 별보다 훨씬 넓은 범위에 걸쳐 분포한다고 알려져있다. 우주 초기에 암흑 물질 헤일로에는 강한 중력때문에 주변의 배리온물질을 끌어당긴다. 배리온 물질이 모여들어 밀도가 높아지면 별이 태어나면서 은하가 형성이 된다. 이후 은하는 시간이 지나면서 기체의 유무, 병합의 존재 등의 조건에 따라 다양한 진화 과정을 겪는다.

그러므로 암흑 물질 헤일로의 특성을 이해하는 것은 헤일로에 속한 은하의 진화를 이해하기 위해 중요하다. 하지만, 암흑 물질 헤일로는 직접 관측할 수 없다. 지금까지 암흑 물질 헤일로에 대한 연구는 암흑 물질과 일반 물질의 중력적 상호 작용에 착안하여, 중력 렌즈 효과나 위성 은하의 동역학적 특성들을 통해 간접적으로 이루어져왔다.

우리는 관측을 통해 은하의 물리량에 대한 정보를 얻을 수 있다. 암흑 물질 헤일로와 은하의 물리량 사이에 일정한 상관 관계가 있다면 관측을 통해 암흑 물질 헤일로의 특성에 대해 이해할 수 있다. 암흑 물질 헤일로의 질량이 큰 경우 더 많은 물질들을 통해 은하를 형성할 것이다. 물질이 많이 모여 더 많은 별 형성이 일어나면 은하는 더 밝아지며, 더 무거운 항성 질량을 가질 것이다. 이를 통해 은하의 밝기 (또는 등급)와 항성 질량이 암흑 물질 헤일로의 질량과 상관관계가 있을 것으로 추정할 수 있다.

이전까지 많은 은하들이 모여있는 은하군, 은하단의 역학적 질량을 추정하는 방법으로 여러가지 방법이 이용되어져왔다. 중력 렌즈 효과를 이용하는 것과 집단에 포함된 모든 은하들의 속도 분산을 통해 역학적 질량을 계산하는 것이 대표적인 방법이다. 비리얼 정리를 이용하면 특정 계의 속도 분산과 질량이 비례한다는 사실을 알 수 있다. 중심부에 무거운 은하가 있다면 주변의 어두운 위성 은하들은 중심 은하의 중력 퍼텐셜에 따라 궤도운동을 할 것이다. 그러므로 위성 은하들의 속도 분산을 측정하면 중심은하의 중력 퍼텐셜에 해당하는 질량을 측정할 수 있다. 결론적으로 위성 은하들의 속도 분산을 측정하면 중심 은하의 암흑 물질 헤일로 질량을 알 수 있다.

본 연구에서는 위성 은하들의 속도 분산을 측정하고, 이를 통해 중심은하의 역학적인 질량을 계산하고자 한다. 은하에서 역학적 질량의 대부분은 암흑물질이 차지한다. 이를 위해 위성은하를 가진 고립된 은하를 선별하였다. 고립된 은하를 선별하기 위해 슬로안 디지털 전천 탐사 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 12차 공개자료를 사용하였다.

Sohn et al. (2016)은 이 자료를 용하여 밀집 은하군(compact groups of galaxies)의 목록을 발표한 바 있다. 이 과정에서 어두운 위성 은하들로 둘러싸인 밝은 중심 은하들의 목록을 새롭게 제시하였다. 본 연구에서는 다른 선별 기준을 적용하여 위성은하의 동역학적 분석에 적합한 고립된 은하의 목록을 새로 작성하였다.

과거에 위성은하의 동역학적 특성을 이용하여 중심 은하의 암흑 물질 헤일로의 특성을 밝히는 연구가 다수 진행되었다 (Zaritsky et al. 1993; Norberg et al. 2008; Wojtak & Mamon 2013).

Norberg et al. (2008)는 2dFGRS의 자료를 이용하여 중심 은하와 위성 은하로 이루어진 은하를 선별하였다. 선별된 위성 은하들의 속도 분산을 이용하여 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정하였다. 위성 은하들의 속도 분산과 중심 은하의  $b_J$ -band의 절대 등급간의 관계를 살펴보았다. Norberg et al. (2008) (그림 13 참조) 중심 은하의  $b_J$ -band 절대 등급  $M_{b_J}$ 와 위성 은하의 속도 분산의 관계를 이전 연구들의 결과와 비교하여 보여주고 있다 (McKay et al. 2002; Brainerd, & Specian 2003; Prada et al. 2003; Brainerd 2004; van den Bosch et al. 2004). Norberg et al. (2008)의 결과에 따르면 은하의  $b_J$ -band 절대 등급

과 위성 은하의 속도 분산이 비례한다. 이는 중심 은하의 절대 등급과 암흑 물질 헤일로 역학적 질량이 비례 관계에 있음을 알려준다. 그러나 기울기의 값은 연구에 따라 큰 차이를 보여준다. van den Bosch et al. (2004)의 결과는  $M_{b,J} \leq -19.5$ 인 구간에서  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 일정한 모습을 보여주고 있다. 나선 은하만을 사용하여 살펴본 Brainerd, & Specian (2003)의 결과도  $M_{b,J}$ 가 변화하는 모든 구간에 따라  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 일정함을 보여준다. 은하의 절대등급은 암흑 물질 헤일로의 질량과 비례관계에 있으나 연구에 따라 차이를 많이 보이므로 추가연구가 필요한 실정이다.

Wojtak & Mamon (2013)은 SDSS의 7번째 공개된 자료를 이용하여 위성은하를 가진 은하를 선별하였다. 선별된 은하의 위성 은하를 이용하여 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정하였다. Wojtak & Mamon (2013)은 중심 은하의 항성 질량과 암흑 물질 헤일로의 질량을 비교하였다. 그 결과 중심 은하의 항성 질량과 암흑 물질 헤일로의 질량이 서로 비례 관계에 있음을 보여준다. 이 관계를 이용하면 측정된 은하의 항성 질량으로부터 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정할 수 있다. 이전 연구들은 은하의 항성 질량을 결정할 때, 약 0.3dex 정도의 오차가 존재함을 보여주고 있다 (Conroy et al. 2009; Behroozi et al. 2010). 그러므로 은하의 항성 질량을 이용한 암흑 물질 헤일로의 질량 추정이 부정확할 수 있다.

Zahid et al. (2018)은 illustris 시뮬레이션을 이용하여 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정할 수 있는 물리량을 제시하고있다. 시뮬레이션의 결과 별 형성이 멈춘 은하의 별 속도 분산과 암흑 물질 헤일로의 질량이 비례한다는 것을 알아내었다. 별 형성이 멈춘 은하의 속도 분산은 약 0.03dex 정도의 오차가 있음을 보여준다 (Fabricant et al. 2013; Zahid et al. 2016a,b). 이는 항성 질량 측정의 경우보다 1/10 수준으로 작은 값이다. 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정하는데에 은하의 별 속도 분산을 이용하는 경우 보다 작은 오차로 질량을 추정할 수 있다.

본 연구에서 중심은하의 속도 분산과 위성 은하의 속도 분산의 관계를 알아보고자 한다. 중심 은하의 속도 분산과 위성 은하의 속도 분산을 비교함으로써 중심 은하의 속도 분산과 암흑 물질 헤일로 질량 사이의 관계를 알아볼 것이다. 이를 통해 은하의 속도 분산이 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정할 수 있는 좋은 물리량임을 제시하고자 한다. 또한



우리의 결과와 Zahid et al. (2018)의 시뮬레이션 결과를 비교할 것이다.

2장에서는 이번 연구에서 사용한 자료와 자료 분석에 대하여 설명한다. 자료를 분석한 결과는 3장에서 제시한다. 결과에 대한 토의와 추가적인 분석은 4장에서 설명하며, 마지막으로 5에서 이번 논문을 요약하여 결론짓는다.

## Chapter 2

# 자료와 자료 분석

### 2.1 SDSS DR12 은하 목록

SDSS (Sloan Digital Sky Survey)<sup>1</sup> 는 뉴멕시코 주, Apache point에 위치한 2.5m 망원경을 이용하여 전 하늘의 약 1/4 영역에 대해 측광 및 분광 관측을 수행하는 탐사 과제이다. SDSS 과제를 통하여 많은 수의 은하가 관측되었다. 2015년까지 208,478,448개의 은하가 관측되어 은하의 구조와 특성에 대한 자세한 정보들을 제공하고 있다.

본 연구에서는 12번째로 공개된 SDSS DR12 (Data Release 12) (Alam et al. 2015)의 자료를 사용하였다. SDSS의 측광 자료는 점광원으로 보이는 별과 점광원보다 크게 보이는 은하를 포함한다. 본 연구에서는 측광 목록에서 제공하는 점광원 확률 변수(probPSF)를 이용하여 2,881,591개의 은하를 선택하였다.

SDSS 관측 자료에서 은하의 밝기를 측정하는데는 몇가지 어려움이 있다. 먼저, 은하의 바깥경계를 정하는 것이 어렵다. 하나의 점처럼 보이는 별과는 달리, 은하의 경우 중심부에서 외곽에 이르기까지 분포한 별에서 방출된 빛으로 인해 점광원보다 크게 보인다. 이때 별의 밀도가 낮은 외곽지역은 표면밝기가 어둡기 때문에 은하 내부의 별의 분포에 따라 밝기의 분포가 달라진다. 거리가 먼 은하의 경우 별의 밀도가 낮은 외곽지역은 관측 한계

---

<sup>1</sup><https://www.sdss.org/dr12/>

등급보다어둡게 보여, 실제 은하에 속한 별이 있음에도 불구하고, 밝기를 측정할 수 없는 경우가 발생한다. 따라서 은하의 측광은 은하의 영역을 어떻게 정의하는지에 영향을 많이 받게 된다. 두번째, 은하의 크기도 다양하기 때문에 점광원의 측광에 이용되는 단순 구경 측광으로는 은하의 밝기를 측정하기 어렵다.

SDSS의 측광 목록의 경우에는 여러 가지 방법으로 은하의 밝기를 측정하여 제공하고 있다. 위와 같은 점을 고려하여 본연구에서는 SDSS측광 목록에서 제공하는 cModel 등급 (composite model magnitudes)을 기본적으로 사용하였다. 은하의 색 정보 (color)가 필요한 경우에는, model 등급으로부터 색을 구하여 사용하였다. 분석에는 우리은하의 소광량 보정 과 K-correction이 적용된 색지수를 사용하였다.

## 2.2 분광 관측 자료

우리는 SDSS 측광 자료로부터 얻어진 은하에 대한 분광 관측 자료를 취합하여 분석하였다. 먼저 SDSS에서 얻어진 분광 관측 자료를 수집하였다. SDSS 분광 관측은 광섬유 (fiber optics)를 이용한 다천체 분광기 (multi-object spectrograph)를 이용하여 수행되었다. SDSS는 r-band에서 17.77 등급보다 밝은 대상들에 대해서만 분광 관측을 수행하였다. 우리가 사용하는 DR12는 기존의 SDSS 분광기와 BOSS 분광기를 사용해 얻어진 관측 자료를 모두 포함한다. SDSS 분광기의 관측 가능한 파장영역은 3800-9200Å의 파장 범위를 포함하며, BOSS 분광기는 3650-10400Å의 파장 범위를 포함한다. SDSS 분광기의 분해능 (Resolving power)은  $R = 1850-2200$ , BOSS 분광기의 분해능은  $R = 1560-2650$ 이다.

SDSS 분광 관측은 여러 천체의 이미지가 나타나는 초점면에 광섬유를 배열한후, 이와 연결된 다천체 분광기를 이용하여 수행한다. 이 때 기기의 설계 특징때문에, 일정 거리보다 가깝게 위치한 두 천체에 동시에 광섬유를 설치할 수 없다. 즉, 천구 상 각거리가 55 각초 (arcsecond) 이내에 위치한 두 천체에 대해 동시에 분광 관측을 수행할 수 없고, 이를 fiber collision 문제라고 한다. fiber collision 문제를 최대한 해결하기 위해 가까이 위치한 서로 다른 천체의 경우, 분광 관측을 여러번 수행하였다.

두 은하가 55"보다 멀리 떨어져 동시에 분광관측이 가능하더라도 분광 관측이 수행되지 않는 경우가 있다. 예를 들어, 한 천체가 주변 천체에 영향을 미칠 정도로 밝은 경우, 이로 인해 주변에 위치하는 천체의 분광 정보가 잘못될 가능성이 있다. SDSS 에서 아주 밝은 ( $m_r < 14.5$ ) 은하들의 경우 은하 이미지의 포화(saturation)으로 인해 주변 은하들에 대한 분광 관측 완결도 (completeness)가 감소하는 것으로 알려져있다 (Park, & Hwang 2009).

우리는 이전에 발표된 논문과 관측 자료들로부터 SDSS 분광 관측에서 누락된 밝은 은하들의 적색이동(redshift)을 수집하였다. 먼저 NASA Extragalactic Database (NED)<sup>2</sup>에 등재되어있는 밝은 은하의 관측 자료들을 수집하였다. 이 관측 자료들에 대한 자세한 내용은 Hwang et al. (2010)에 기술되어있다. 또한 Fred Lawrence Whipple Observatory에 위치한 60인치 망원경에 부착된 FAST 분광기를 이용해 측정한 적색 이동량 등 (Sohn et al. 2015)도 추가하였다.

### 2.2.1 $D_n4000$

$D_n4000$ 은 분광 관측으로부터 얻을 수 있는 값으로 은하의 성질에 대한 유용한 정보를 제공한다 (e.g. Kauffmann et al. 2003; Mignoli et al. 2005; Vergani et al. 2008; Woods et al. 2010; Geller et al. 2014; Zahid et al. 2016b).  $D_n4000$ 은 4000Å의 파장을 기준으로 단파장, 장파장 구간에서 측정된 플럭스의 비로 정의된다 (Bruzual A. 1983). 이후 다양한 연구에서 단파장과 장파장 구간을 약간씩 바꾸어가며  $D_n4000$ 을 정의하였다. 우리는 최근 많은 연구에서 사용되는 Balogh et al. (1999)의  $D_n4000$ 정의를 따라, 4000-4100Å구간과 3850-3950Å구간의 플럭스 비로 정의된  $D_n4000$ 을 사용하였다:

$$D_n4000 = \frac{\text{Flux}_{4000-4100\text{\AA}}}{\text{Flux}_{3850-3950\text{\AA}}}. \quad (2.1)$$

이렇게 구해진  $D_n4000$ 은 과거 Bruzual A. (1983)에서 사용한 단파장, 장파장 구간에 비해 좁은 영역의 플럭스 비를 사용하였다. 더 좁은 스펙트럼 구간을 이용하여  $D_n4000$ 을 정의

<sup>2</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

할 경우 적색화 (reddening)에 의한 효과가 확연하게 줄어든다는 장점이 있다 (Kauffmann et al. 2003).

$D_n4000$ 은 다양한 장점을 가지고 있는 분광 지시자(spectroscopic indicator/measure)이다.  $D_n4000$ 은 측정하기 쉽고, 일반적으로 높은 정밀도를 갖는다.  $D_n4000$ 은 분광 관측에서 측정되므로, 성간 적색화나 적색 이동량에 큰 영향을 받지않는다. 시상(seeing)을 포함한 측광에서의 조건들도 영향을 미치지 못한다 (Kauffmann et al. 2003).

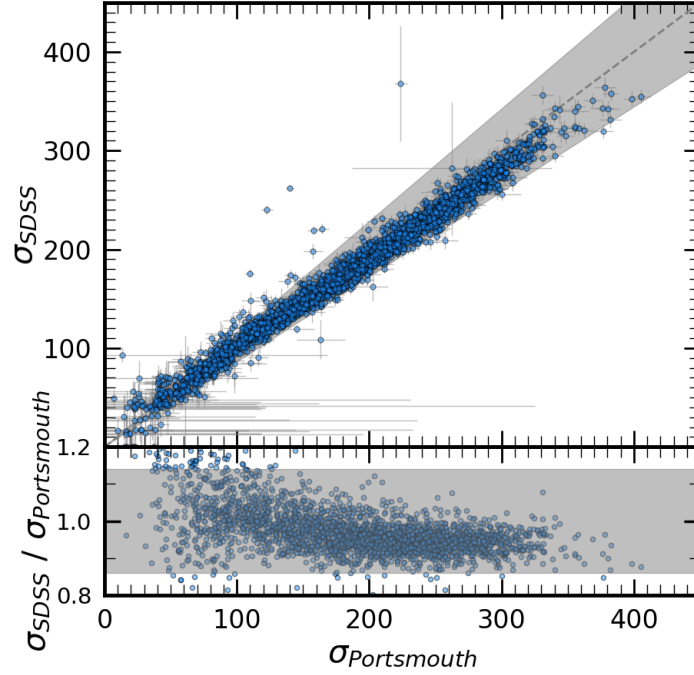
$D_n4000$ 은 은하를 구성하고 있는 별 종족의 평균 나이(mean stellar population age)와 좋은 비례 관계를 보이는 것으로 알려졌다. Kauffmann et al. (2003)은 은하를 구성하고 있는 별 종족의 평균 나이가 천만년 이상일 경우,  $D_n4000$ 이 별 종족 평균 나이에 비례하여 증가함을 보여주었다 (Figure 2, Kauffmann et al. 2003).  $D_n4000$ 은 별 종족의 나이 뿐 아니라, 별 종족의 중원소함량(metallicity)와도 연관성이 있는 것으로 알려졌다. 하지만, 중원소함량에 대한 경향성은 별 종족 나이에 대한 경향성에 비해 적다. 우리는  $D_n4000$ 을 이용하여 별 형성이 멈춘 은하(quiescent galaxies)들을 선별하였다. ( $D_n4000 > 1.6$ 은 10 억년보다 많은 나이에 해당한다).

## 2.2.2 별 속도 분산 (Stellar velocity dispersion)

분광 관측을 통해 각 천체의 중심 속도 분산을 측정할 수 있다. 중심부의 스펙트럼은 천체의 시선방향 운동때문에 파장의 위치가 옮겨지며, 흡수선(방출선)은 천체 중심의 속도 분산때문에 방출선의 폭 자체가 넓어진다. 이러한 현상을 도플러 선폭 증가 (doppler broadening)라고 부른다. 은하 은하의 속도분산은 각 별의 운동 때문에 나타난다. 그러므로 은하 중심부의 스펙트럼에서 흡수선의 폭을 측정하면 이 위치에 있는 별들의 속도 분산을 알 수 있다.

SDSS에서는 각 fiber를 통해 얻어진 은하 스펙트럼에 대하여 여러가지 방법으로 측정한 은하의 중심속도분산값을 제공한다. 우리는 이 중 Portsmouth reduction (Thomas et al. 2013)을 이용하여 얻은 결과를 사용한다. 이 결과는 신호대 잡음비가 낮은 경우에 다른 결과에 비하여 오차가 비교적 작다. Thomas et al. (2013)은 Penalized Pixel-Fitting

(pPXF) 코드 (Cappellari, & Emsellem 2004)를 이용하여 은하의 중심 별 속도 분산  $\sigma_*$ 를 계산하였다.



**Figure 2.1.** 중심 은하의 Portsmouth 별 속도 분산과 SDSS pipeline의 속도 분산 결과 비교. x축은 Portsmouth의 속도 분산 (Thomas et al. 2013), y축은 SDSS의 pipeline에서 계산된 속도 분산을 나타낸다. 회색의 파선은  $\sigma_{SDSS}$ 와  $\sigma_{Portsmouth}$ 의 1대 1 비례 관계에 해당하는 선이다. 회색 영역은  $\sigma_{Portsmouth}$ 의 일반적인 측정 오차값인 14%에 해당하는 범위이다 (Thomas et al. 2013). 14%의 오차 범위를 벗어나는 은하들은 중심 별 속도분산이 잘못 측정되었을 가능성이 높기 때문에 표본에서 제외한다.

Thomas et al. (2013)은 이 전의 SDSS pipeline을 이용한 별 속도 분산과 그들의 결과를 비교하고 있다. 전형적인 측정 오차는 14%정도로 언급되어 있다. 우리가 선별한 은하표본에 대해 이전 SDSS pipeline을 통해 얻어진 별 속도 분산과 우리가 사용하는 Portsmouth reduction (Thomas et al. 2013)의 결과를 비교하였다. 그림 2.1는 SDSS의 pipeline과 Portsmouth reduction의 결과를 비교한 그림이다. 선별된 표본에서 전형적인 14% 오차 범위보다 더 큰 차이를 보여주는 중심 은하들이 존재함을 확인할 수 있다. 이에 해당하는

중심 은하는 별 속도 분산이 잘못 측정되었을 가능성이 높다. 따라서 우리는 중심 은하의 별 속도 분산을 사용하기 위해 SDSS의 결과와의 차이가 14% 이상인 중심 은하들을 제거하였다.

## 2.3 고립된 은하 목록

우리는 위성 은하를 가진 고립된 은하를 찾아, 위성은하의 속도분산을 구하고, 이로부터 이 은하에 있는 암흑 물질 헤일로 질량을 측정 한 후, 이를 모은하의 중심 속도분산과 비교하고자 한다 우리는 SDSS에서 체계적으로 이런 은하들을 선별하여 목록을 작성하였다.

위성은하를 가진 고립된 은하를 찾기 위해 SDSS 분광 자료에 대해 Friends-of-Friends 알고리즘 (이하 FoF 알고리즘, Huchra, & Geller 1982)을 적용하였다. FoF 알고리즘은 한 은하로부터 일정한 거리 안에 위치하는 다른 은하를 찾고, 다시 그 은하로부터 일정 거리 안에 위치하는 다른 은하를 찾아, 조건을 만족하는 은하가 없을 때까지 이웃 은하를 찾는다. FoF 알고리즘은 은하군 및 은하단 등을 찾고자 할때 광범위하게 적용되는 방법이다. 이 알고리즘을 이용하여, 여러 분광 자료로부터 다양한 종류의 은하군 목록이 과거에 만들어졌다 (Huchra, & Geller 1982; Barton et al. 1996; Robotham et al. 2011; Tempel et al. 2012, 2014; Sohn et al. 2016).

우리가 사용한 FoF 알고리즘은 두 가지 변수를 필요로한다. 첫째로, 천구 상에서의 투영된 두 은하 사이의 거리 (projected distance,  $\Delta D$ )이다. 각 은하 사이의 거리가 투영된 거리  $\Delta D$ 보다 작은 경우, 두 은하를 이웃 은하로 간주할 수 있다. 두번째로, 두 은하의 시선 방향 속도 차이 (또는 거리) (radial distance or radial velocity,  $v_{los}$ )이다. 예를 들어, 시선 방향에 가까이 있는 은하 두 개가 비슷한 속도를 가지고 있을 때 (또는 비슷한 거리에 있을 때), 우리는 두 은하가 서로 중력적으로 묶여있다고 할 수 있을 것이다. 은하의 적색이동량으로부터 얻어진 시선 방향 속도를 이용하여 두 은하의 시선 방향 거리를 근사적으로 추정할 수 있다.

FoF 알고리즘을 적용할 때의 조건에 따라 찾아진 은하계(galaxy system)의 특징이

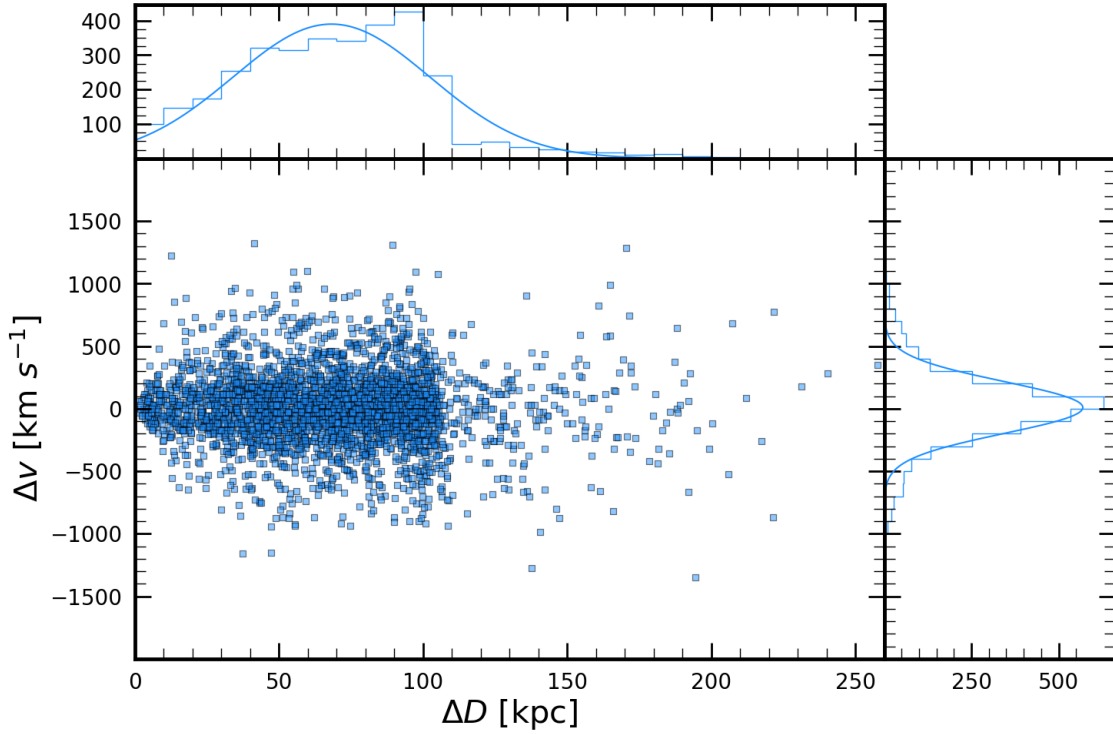
결정된다. 먼저,  $\Delta D$ 의 크기에 따라 찾아진 은하계의 물리적 크기가 결정된다.  $\Delta D$ 를 매우 크게 하면 많은 은하들이 연결된 거대한 구조를 찾을 수 있지만, 중력적으로 상호작용하지 않을 가능성이 높아진다. 반대로 너무 작은  $\Delta D$ 를 사용하게 되면 이웃하는 은하를 찾기가 어려워지게 되고, 찾아진 은하계의 대부분은 병합하는 과정이거나, 우연히 시선 방향에서 겹친 경우일 것이다.  $v_{los}$ 조건은 운동학적인 분석에 있어 직접적인 영향을 미칠 수 있다 (e.g. Zaritsky et al. 1993; Norberg et al. 2008; Wojtak & Mamon 2013).  $v_{los}$ 가 너무 크게 되면 실제로 중력적으로 묶여있지 않은 시선 방향에 위치한 은하들 (interloper)에 인한 오염이 발생한다. 반면에  $v_{los}$ 가 너무 작게 되면 통계 분석에 사용할 표본의 숫자를 충분히 확보하지 못할 수 있다 (Norberg et al. 2008).

우리는 Sohn et al. (2016)에서 사용한 조건을 수정하여 아래와 같은 조건을 사용하여 대상은하를 선택하였다: i)  $\Delta D \leq 100 \text{ kpc}$ , ii)  $|v_{los}| \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$ . 추가적으로 주 은하와 위성 은하의 등급 차이가 r-band에서 2등급 이상 커야한다는 조건을 적용하였다. 일반적으로 은하의 밝기는 은하의 별 질량에 비례한다. 즉, 주 은하가 위성 은하에 비해 매우 밝다면 주 은하의 질량이 위성 은하에 비해 클 것이다. 이 연구의 목적은 위성 은하의 운동학적 분석을 통해 주 은하가 중심에 위치한 은하군의 암흑 물질 헤일로 질량을 측정하는 것이다. 위성은하의 질량이 주 은하에 비해 매우 작다면 위성은하의 운동으로부터 주 은하의 중력장을 구할 수 있다. 따라서 주 은하와 질량이 비슷한 위성 은하를 가진 은하는 제거할 필요가 있다. 이를 위해 우리는  $m_r > 2$ 인 조건을 사용하여 서로 질량이 비슷한 은하들로 구성된 은하군들을 제외하고, 가벼운 위성은하만을 가진 은하를 선별했다. 선별된 은하의 수는 아래 표 2.1에 기술되어 있다.

| Sample Criteria             | Primary | Satellite |
|-----------------------------|---------|-----------|
| FoF algorithm               | 3390    | 4218      |
| Matching with SDSS $\sigma$ | 2648    | 3273      |

**Table 2.1.** 선별된 표본의 숫자





**Figure 2.2.** (a) 위상 공간 (phase-space)에서 은하 표본에 속한 위성 은하들의 분포. 가로 축은 중심 은하로부터 측정된 천구 상의 투영된 거리 (projected distance), 세로 축은 중심 은하와의 상대적인 시선 방향 속도 차이를 보여준다. 각 은하계의 중심 은하들은 그림의 (0,0)에 위치하여 표시하지 않았다. (b) 위성 은하들의 중심 은하로부터 천구상에 투영된 거리의 분포. (c) 위성 은하와 중심 은하와의 상대적인 시선 방향 속도 차이 분포.

그림 2.2은 우리가 선별한 위성 은하들의 위상 공간 상의 분포를 나타낸 그림이다. 중심 은하를 기준으로 위성 은하가 떨어진  $\Delta D$ 와 속도 차이  $\Delta v_{los}$ 를 보여주고 있다. 천구상 투영된 거리  $\Delta D$ 의 분포를 살펴보면 100kpc보다 멀리 떨어진 위성 은하의 수가 급격히 감소한다. 선별된 표본에는 중심 은하당 위성 은하의 개수가 1개인 이중 (binary) 은하가 가장 많은데, 이들은 대부분 100kpc 안에 있다. 위성 은하가 2개 이상인 경우에만 100 kpc 보다 멀리 위성은하가 존재할 수 있다.

$\Delta v_{los}$ 의 분포를 살펴보면 전체적으로 위성 은하의  $\Delta v_{los}$ 분포가 정규 분포에 가깝다는 사실을 알 수 있다.  $|\Delta v_{los}| \geq 500 \text{ km s}^{-1}$ 인 경우 가우스 함수로 피팅된 결과보다 실제 위성

은하의 수가 많은 것으로 보인다. 이나는 아마도 중심은하에 중력적으로 묶이지 않은 은하 (즉 전경 또는 배경 은하, interloper) 때문일 것으로 추정된다.

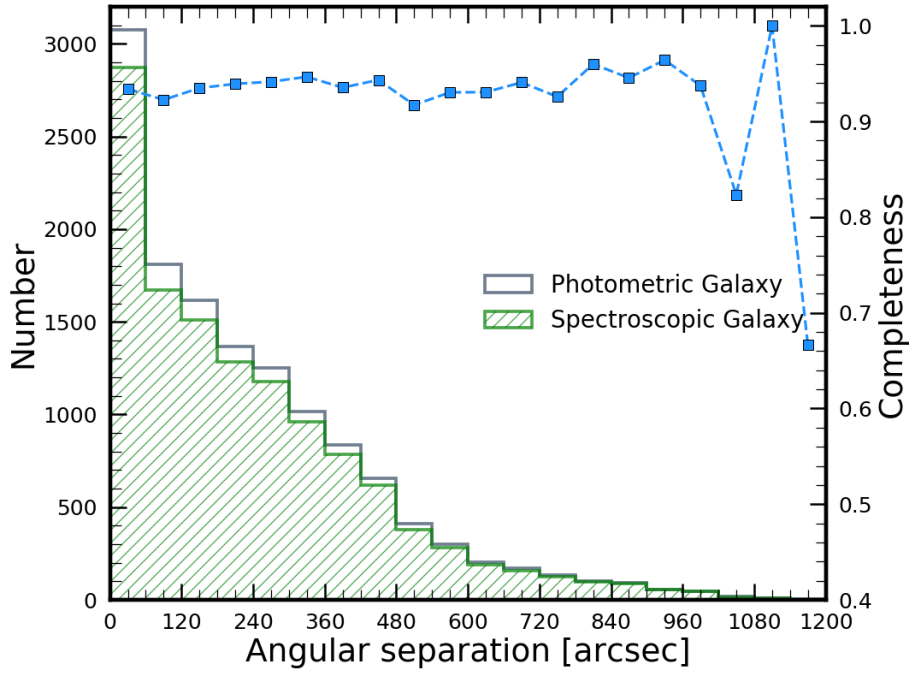
## 2.4 분광 관측 완결성 (completeness)

SDSS 분광 관측은  $m_r < 17.77$  등급보다 밝은 은하를 주대상으로 하고 있으나,  $m_r < 14.5$  등급인 은하는 포화되었고, 또한 fiber collision 등의 문제 때문에, 이런 은하를 모두 포함하지 못한다. 그러므로 이러한 분광관측의 불완결성이 표본 특성에 영향을 조사하였다.

두 영향을 확인하기 위해 우리의 표본 중 다음 장에서 설명할 중심 은하를 기준으로 특정 크기의 반지름을 가진 시선방향의 원통을 가정하였다. 그 원통 내에 들어오는 측광 관측이 수행된 은하들 중 분광관측이 이루어진 은하들의 개수 비율로 분광 관측의 완결성을 정의하였다. 그리고 관측을 통해 얻을 수 있는 중심 은하의 물리량에 따라 분광 관측의 완결성을 조사하였다.

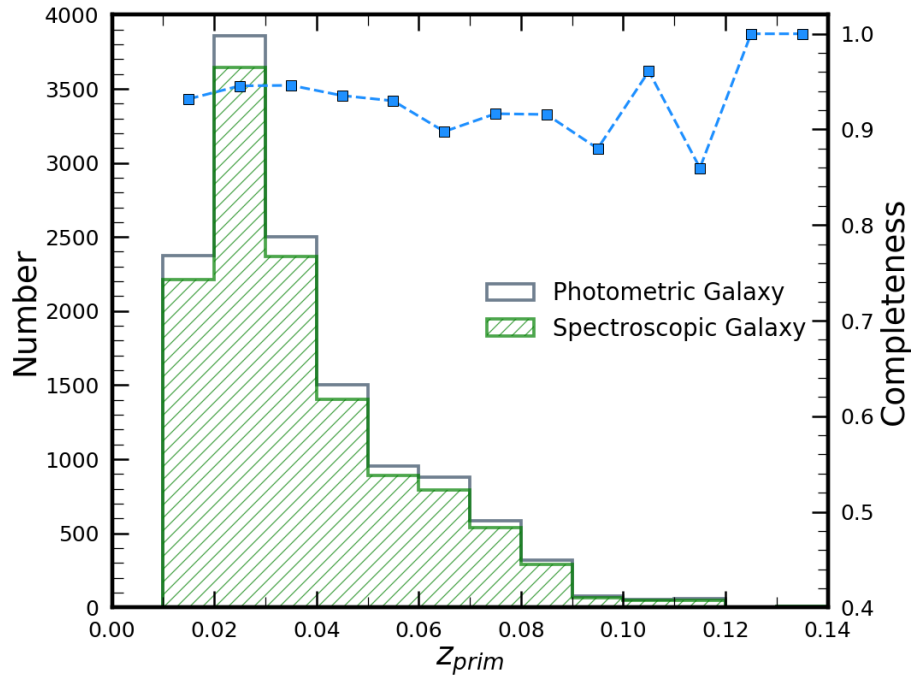
그림 2.3는 중심 은하로부터 위성 은하가 위치한 각거리에 따른 분광 관측의 완결성을 확인한 결과이다. 우리는 표본은하가 위치할 수 있는 천구에 투영된 거리를 이용하여 원통을 가정하였다. SDSS의 분광 관측은 광섬유를 이용하여 관측하기 때문에 55각초보다 가까운 은하를 구분할 수 없는 fiber collision의 문제가 존재한다. 우리의 중심 은하 표본을 기준으로 55각초보다 가까운 은하들이 많다면 분광 관측이 수행되지 않은 은하가 많이 존재할 수 있다. 우리 표본에 대한 결과는 본중심 은하로부터 떨어진 각거리에 따라 관측된 은하 중 90% 이상의 은하에 대해 분광 관측이 수행되었음을 알 수 있다. 예상과는 다르게 55각초보다 가까운 은하들에 대해 fiber collision으로 인한 효과가 매우 작다. 우리가 선별한 중심 은하 주변에 분포하는 은하들에 대부분 분광관측이 수행되었다. 이를 통해 우리가 선별한 위성 은하들은 공간 분포상 충분히 고르게 선별되었음을 알 수 있다. 우리가 위성 은하를 통해 운동학적 분석을 수행한 결과는 공간 분포에 대한 bias가 없을 것으로 판단된다.

그림 2.4는 중심 은하의 적색 이동에 따른 분광 관측의 완결성을 보여주는 결과이다.



**Figure 2.3.** 중심 은하를 기준으로 하여 각거리 간격마다 고리로 영역을 설정하였다. 설정한 영역 내에 측광이 수행된 모든 은하들 중 분광 관측이 수행된 은하들의 비율을 계산한 결과이다. 각거리는 우리가 관측적으로 파악할 수 있는 물리량이기 때문에 실제 투영된 거리가 아닌 각거리를 기준으로 분광 관측의 완결성을 분석하였다.

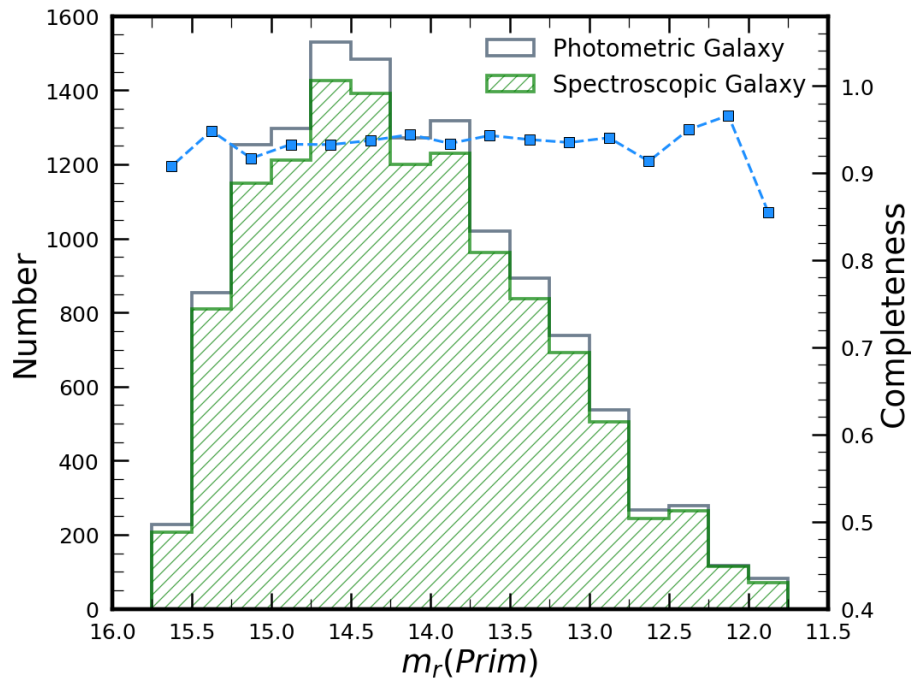
우리의 표본 중 적색 이동값이  $z_{Prim} \leq 0.01$ 이거나  $0.10 < z_{Prim} \leq 0.14$ 인 표본이 매우 본적다는 것을 확인할 수 있다. 은하 수가 적은 적색 이동 구간에서는 분광 관측의 완결성이 매우 낮거나 매우 높은 값을 보여주고 있다.  $0.01 < z_{Prim}$ 인 적색 이동 구간에서는 은하의 숫자에 관계없이 0.8 이상의 분광 관측 완결성을 보여주고 있다. 우리가 선별한 중심 은하의 적색 이동에 따라 위성 은하의 운동학적 분석을 수행하는데에 큰 경향성 없이 분석을 수행할 수 있다. 위에서 언급한 내용처럼 특정 적색 이동을 가지는 중심 은하의 위성 은하 개수는 매우 적은것을 알 수 있다. 은하의 숫자가 적으며 분광 관측의 완결성이 낮은  $z_{Prim} \leq 0.01$ 이거나  $0.10 < z_{Prim} \leq 0.14$ 인 중심 은하들을 주의할 필요는 있다. 그러나 충분히 많은 위성 은하 표본이  $0.01 < z_{Prim} \leq 0.12$  구간에 존재한다. 우리가 모든 중심 은하를 하나로 쌓아 위성 은하들을 함께 분석하면 분광 관측 완결성이 낮은 부분으로



**Figure 2.4.** 중심 은하의 적색 이동에 따른 분광 관측의 완결성을 분석한 결과이다. 중심 은하의 적색 이동 값을 일정 구간으로 나누었다. 일정 구간에 속한 중심 은하 주변의 위성 은하들에 대해 측광 결과가 있는 은하 중 분광 자료가 있는 은하의 비율로 y축 값을 계산하였다.

인한 결과의 차이는 거의 없을 것으로 판단된다.

그림 2.5은 중심 은하의 겉보기 등급을 기준으로 위성 은하들의 분광 관측 완결성을 분석한 결과이다. SDSS의 분광 한계 등급은 r-band에서 17.77등급이다. 우리는 위성 은하와 중심 은하의 등급 차이 조건을 최소 2등급 이상으로 설정하였다. 따라서 우리의 중심 은하 표본의 r-band 겉보기 한계등급은 15.77등급이다. 이는 중심 은하의 등급에 의해 은하군이 누락되지 않도록 표본을 선별할 수 있는 기준이다. 중심 은하의 겉보기 등급이 11.5등급 보다 큰 경우에는 분광 관측의 완결성 변화가 굉장히 큰 모습을 볼 수 있다. 중심 은하가 매우 밝은 경우 은하와 가까이 위치한 다른 천체들의 측광을 수행하기 매우 어려울 수 있다. 본 우리 표본의 경우 개수 분포에서 볼 수 있듯이  $11.5 < m_r(Prim)$ 인 경우 위성



**Figure 2.5.** 중심 은하의 안시 등급에 따른 분광 관측의 완결성. 중심 은하의 안시 등급 값에 따라  $m_r < 17.77$ 인 위성 은하들에 대해 측광 결과가 있는 은하들 중 분광 자료가 있는 은하들의 비율로 y축 값을 계산하였다. 우리가 선별한 표본의 분광 관측 완결성에 대해 전체적인 문제가 있지 않다고 검증하였다.

은하의 개수가 매우 적은 것을 볼 수 있다. 표본의 개수가 매우 본적기 때문에 중심 은하의 밝기가 분광 관측의 완결성을 떨어뜨리는 원인으로 단정짓기 어렵다.

중심 은하로부터의 각거리, 중심 은하의 적색 이동과 겉보기 등급에 대해 분광 관측의 완결성을 살펴보았다. 중심 은하의 적색 이동과 겉보기 등급에 대한 완결성의 경우 몇몇 구간에서 0.8보다 낮은 완결성을 가지고 있다. 이 구간에 포함된 위성 은하의 개수는 매우 적다. 그러므로 분광 관측 완결성이 낮은 몇몇 구간이 선별된 표본 전체에 대한 영향은 미비할 것으로 판단되었다. 우리가 선별한 중심 은하와 위성 은하로 이루어진 은하 표본은 중심 은하로부터의 각거리, 중심 은하의 적색이동 또는 겉보기 등급에 대한 경향성이 없다고 판단할 수 있다.

## 2.5 표본 은하의 분류

SDSS 분광 관측 자료로부터 우리가 측정한 속도 분산은 은하 SDSS는 광섬유를 이용하여 분광 관측을 수행하기 때문에 우리가 얻은 속도 분산은 은하의 중심부 영역에 대한 속도 분산이다. 은하가 멀리 있을수록 하나의 광섬유가 더 많은 영역의 은하를 관측하게 된다. SDSS와 BOSS 분광기에서 사용하는 광섬유의 크기는 각각 3각초, 2각초이다. 은하가 멀리 위치하여 광섬유가 더 넓은 영역을 관측할 수 있더라도 하나의 광섬유로 모든 영역을 관측할 수 없다. 은하가 역학적으로 안정된 상태(relaxed)라면, 우리가 관측하는 중심부의 속도 분산이 은하 전체의 속도 분산을 대변할 수 있다.

나선 은하는 크게 팽대부와 원반의 두 구조로 이루어져 있다. 팽대부와는 달리 원반의 경우 강한 회전을 보이고 있다. 나선 은하에 대하여 우리는 팽대부 영역에 해당하는 속도분산을 측정할 수 있다. 팽대부의 속도 분산을 통해 팽대부의 질량을 알 수 있지만 원반에 대한 질량을 알 수 없기 때문에 나선 은하의 경우 중심  $\sigma_*$ 를 통해 은하 전체의 질량을 대변하기 어렵다. 우리가 나선 은하를 보는 방향이 edge-on에 가까운 경우 원반에 팽대부가 가려질 수 있다. edge-on 은하를 보는 경우 중심의 속도 분산이 아니라 원반의 회전으로 인한 도플러 선폭증가가 일어날 것이며, 관측을 통해 얻은  $\sigma_*$ 의 값이 실제보다 적을 것이다. 나선 은하의  $\sigma_*$ 값을 사용하기 위해서는 나선 은하의 경우 우리의 시선 방향과 원반이 이루는 각도를 고려하여야 한다.

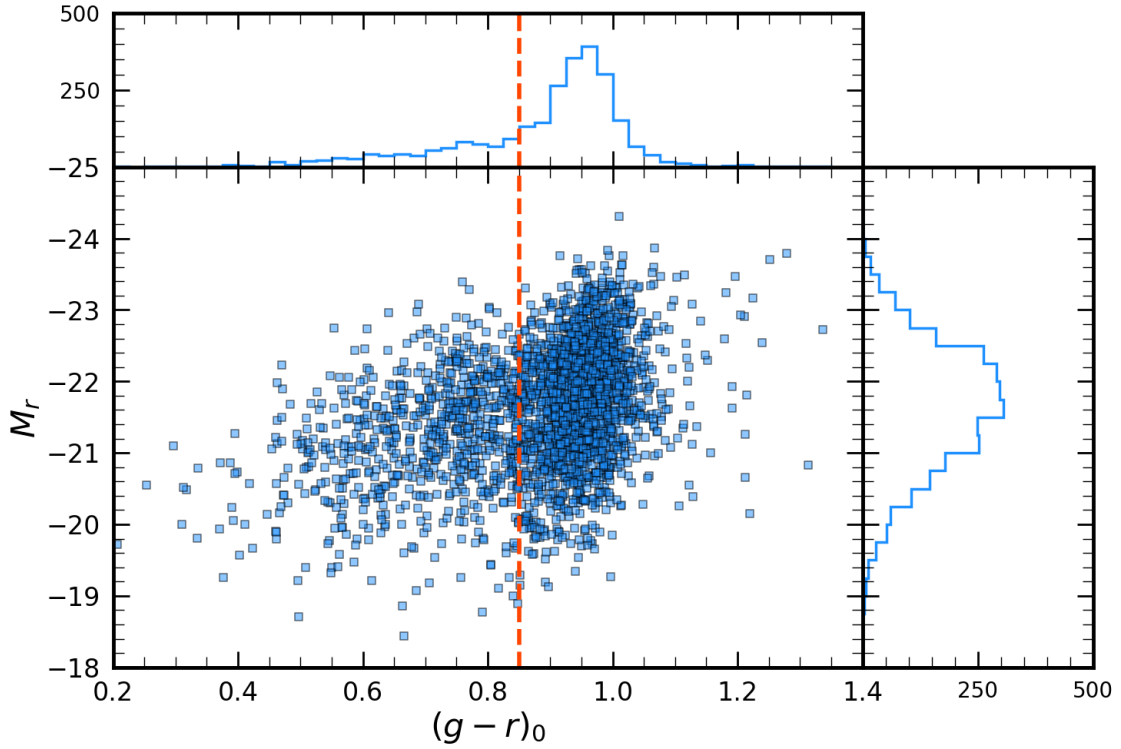
본 연구에서는 나선 은하로 인한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$  측정의 오차를 제거하기 위해 다음과 같은 조건을 사용해 부 표본을 선별하였다.

1. 모은하의  $(g-r)_0$  색
2. 모은하의  $D_n4000$

### 2.5.1 $(g-r)_0$ 색을 이용한 은하 분류

은하의 색은 은하의 여러 정보들을 추정할 수 있는 효과적인 물리량이다. 기존의 연구에서는 이러한 특징을 이용해 은하의 특성을 분석할 때, 특정 색을 기준으로 적색 은하와 청색

은하의 두 분류로 분석을 수행하였다. 이는 색의 분류를 통해 적색 조기형 은하와 청색 만기형 은하로 나누는 것이다. 본 연구에서 사용한 모은하의 표본도  $(g-r)_0$  색 정보를 이용하여 두 종류로 나누었다.

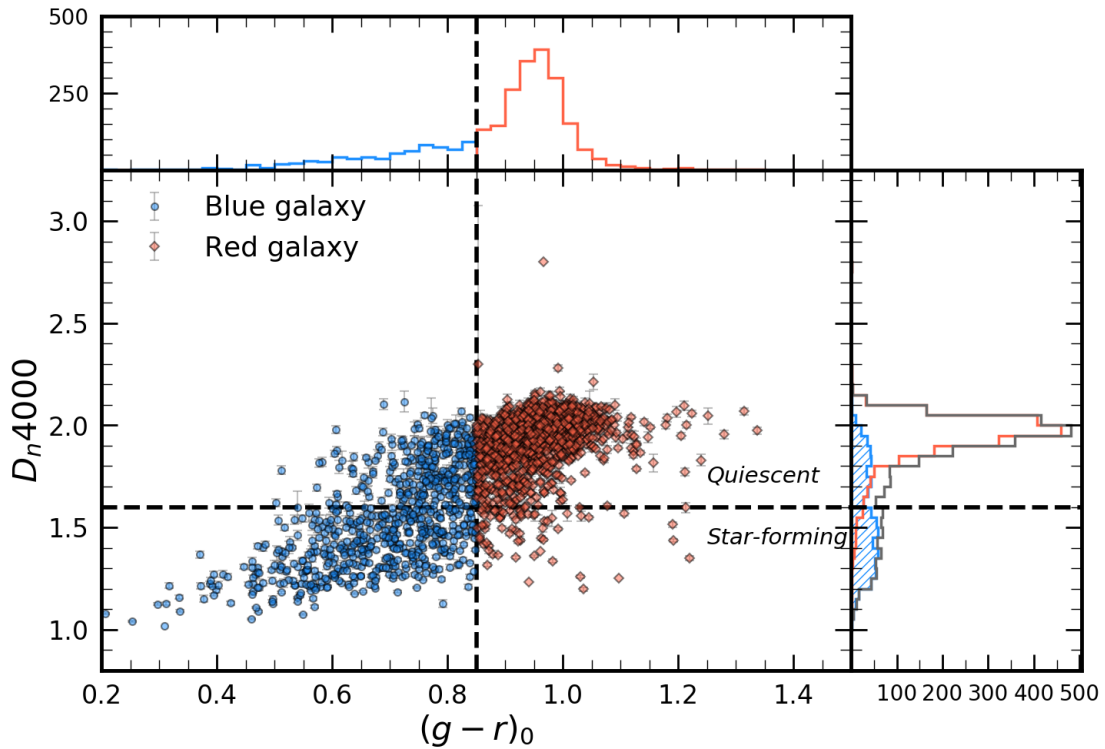


**Figure 2.6.** 모은하 표본의 색-등급도. 가로 축은 cModel 등급으로 계산한 r-band 절대 등급, 세로 축은 model 등급으로 계산한  $(g-r)_0$  색을 나타낸다. 우리는  $(g-r)_0 = 0.85$ 를 기준으로 하여 적색 모은하와 청색 모은하를 구분하였다.

그림 2.6는 우리가 사용하는 모은하 표본의 색-등급도이다. 색-등급도 상에서  $(g-r)$ 이 0.85보다 큰 경우에 모은하의 표본이 대부분 분포하고 있으며,  $(g-r) < 0.85$ 인 은하들은 큰 색지수 범위에 걸쳐 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러므로  $(g-r)_0 > 0.85$ 인 은하를 적색 은하,  $(g-r)_0 < 0.85$ 인 은하를 청색은하로 분류하였다. 적색은하는 만기형은하, 청색은하는 조기형은하를 나타낸다. 낸

### 2.5.2 $D_n4000$ 을 이용한 은하 분류

조기형 은하는 타원형의 모습을 보이며, 오랜 시간 진화를 거쳤기 때문에 만기형 은하에 비해 최근의 별 형성이 매우 적다. 별 형성이 멈춘 은하들을 선별하기 위해 우리는  $D_n4000$  물리량을 이용하였다 (Kauffmann et al. 2003).  $D_n4000$ 을 이용하여 별 형성이 멈춘 모은하를 선별하였을 때, 선별된 대부분의 모은하들이  $(g - r)_0 > 0.85$ 를 만족할 것으로 예상된다. 이러한 예상을 확인하기 위해 우리는 그림(2.7)에서 모은하의 색과  $D_n4000$ 의 분포를 살펴보았다.



**Figure 2.7.** 중심 은하들의  $D_n4000$ 과  $g - r$  색 분포도. 수평한 점선은 별 형성이 멈춘 은하를 고르기 위해 적용한 기준인  $D_n4000 = 1.6$ 을 보여준다. 수직한 점선은 그림 2.6에 적용한  $(g - r)_0 = 0.85$ 를 나타내었다. 빨간색 점들은 색-등급도를 이용해 골라낸 적색 은하를, 파란색 점들은 청색은하를 보여준다. 우측 히스토그램의 회색 선은 모든 모은하 표본에 대한  $D_n4000$ 값의 분포를 나타내고 있다.



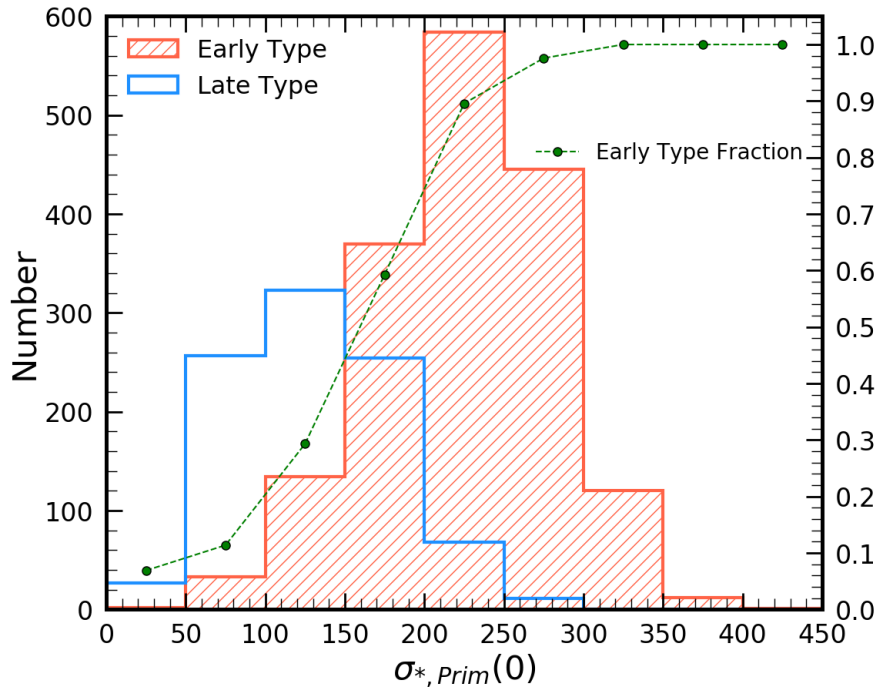
기존의 연구들은 별 형성이 멈춘 은하를 선별하는  $D_n4000$ 의 기준을 1.4-1.6의 범위에 걸친 값을 사용하였다 (Geller et al. 2014; Sohn et al. 2017). 모은하 표본의 히스토그램을 살펴보면, 선별된 모은하 표본 중 청색 은하가  $D_n4000 = 1.6$ 을 기준으로 이중 분포(bimodal)를 보여준다. 우리의 표본은 1.6을 기준으로 분포가 구분되어 보이므로 본 연구에서는 별 형성이 멈춘 은하들을 선별하기 위해  $D_n4000 \geq 1.6$ 의 조건을 사용하였다. 기존의 연구들에서 사용한  $D_n4000 > 1.4$  혹은  $D_n4000 > 1.5$ 를 이용하여 별 형성이 멈춘 은하들을 정의하여 분석을 수행하여도 이 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하였다.

만기형 은하로 인한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 의 오차를 줄이기 위해  $(g-r)_0$  색과  $D_n4000$  두 물리량을 함께 이용하여 모은하를 분류하였다. 이번 연구에서는 두 조건을 모두 활용하여 다음과 같이 총 네가지 중심 은하 표본들에 대해 분석을 수행한다

1. 모든 고립된 중심 은하
2.  $(g-r)_0 = 0.85$ 를 기준으로 한 적색 모은하와 청색 모은하
3.  $D_n4000 \geq 1.6$  인 별 형성이 멈춘 중심 은하
4.  $D_n4000 \geq 1.6$  이며, 적색인 중심 은하 .

### 2.5.3 모은하의 형태 분류

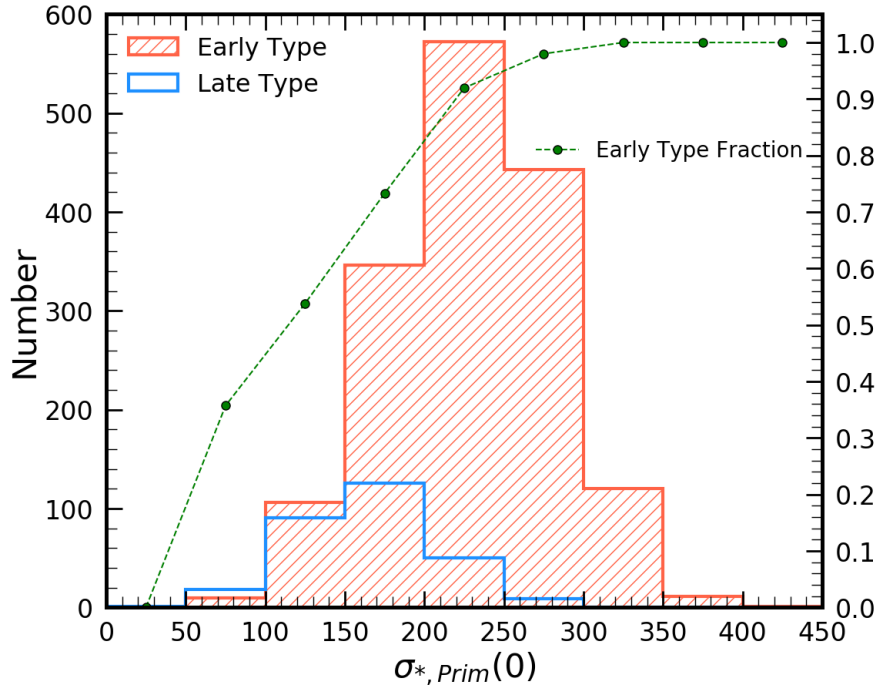
모은하를 정량적으로 분류하기 위한 조건을 2.5.1, 2.5.2 장에서 설명하였다. 우리가 적용한 조건들로 부 표본들이 잘 분류되었는지 확인하기 위하여, KIAS Value-added catalog (Choi et al. 2010) 에 제공하는 모은하의 형태를 가지고 추가적인 분석을 수행하였다. 이번 연구에서는 모은하의 형태로 추가 분류는 하지 않고, 위 조건들의 결과만을 확인 및 비교하였다. 그 이유는 은하의 형태를 분류하는데 경우에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 결과에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단하였다. 따라서 우리는 모은하 표본들을 분류할 때 정량적인 수치를 기준으로 분류하였고, 모은하의 형태 분류는 우리가 적용한 조건들이 적절한지 여부를 판단하는 근거로서 사용한다.



**Figure 2.8.** 모든 모은하 표본들에 대한 조기형 은하와 만기형 은하의 분포 그래프. 각 모은하의 형태 분류는 Choi et al. (2010)의 결과를 사용하였다. 파란색은 나선 은하, 그리고 적색색은 타원 은하의 모양을 의미하며, 초록색으로 표기된 점은 각 구간에서 전체 은하들 중 타원 은하의 개수 비율을 의미한다.

그림 2.8은 우리가 선별한 모든 은하에 대한 조기형과 만기형 은하의 분포를 나타낸 그림이다.  $\sigma_{*, Prim}(0) \leq 150 \text{ km s}^{-1}$ 인 구간에서는 만기형 은하의 개수가 훨씬 많아 조기형 은하의 비율이 0.3 보다 작은 모습을 볼 수 있다. 이 경우 우리가 언급한 만기형 은하들의  $\sigma_{*, Prim}(0)$ 가 잘못 측정되어 전체적인 통계 분석이 어려울 수 있다. 전체 모은하를 이용하여 분석을하면 많은 수의 표본을 확보할 수 있으나  $\sigma_{*, Prim}(0)$ 가 작은 구간에 대해서는 만기형 은하의 영향을 주의하여야 한다. 만기형 은하를 줄이기 위해 추가적으로 선별한 모은하 부표본들에 대하여 동일한 분석을 수행하였다.

그림 2.9는 적색 모은하 부표본들에 대한 형태 분류 결과이다. 전체 모은하 표본을 사용한 분석보다 만기형 은하의 수가 크게 감소했음을 볼 수 있다. 표본의 수가 작고, 조



**Figure 2.9.** 색-등급도에서  $(g-r)_0 > 0.85$  조건을 만족하는 적색 모은하 부표본에 대한 형태 분류 결과.

기형 은하의 비율이 0.3정도로 낮은  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 100 \text{ km s}^{-1}$ 인 구간을 제외하고 모든 구간에서 조기형 은하의 비율이 0.5 이상임을 확인할 수 있다.

그림 2.10는 조기형 모은하를 분류하기 위한 또 다른 기준인  $D_n4000$ 을 이용하여 분류한 별 형성이 멈춘 모은하 부표본들에 대한 분류 결과이다.  $D_n4000$ 조건을 적용하였을 때도 마찬가지로 만기형 은하의 개수가 크게 감소하는 모습을 볼 수 있다. 그림에도  $100 < \sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 150 \text{ km s}^{-1}$ 일 때, 조기형 은하보다 만기형 은하가 여전히 많이 분포하는 모습을 볼 수 있다.

$(g-r)_0 > 0.85$ 인 조건과  $D_n4000 \geq 1.6$ 을 모두 만족하는 별 형성이 멈춘 적색 은하에 대한 형태 분류 결과는 그림 2.11이다. 표본의 숫자가 가장 적지만 이전의 부표본들에서 만기형 은하가 많이 분포하였던  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 150 \text{ km s}^{-1}$ 구간을 포함한 전 구간에서 조기형 은하의 비율이 0.5 이상임을 알 수 있다. 따라서 적색 모은하 부표본과 별 형성이 멈춘

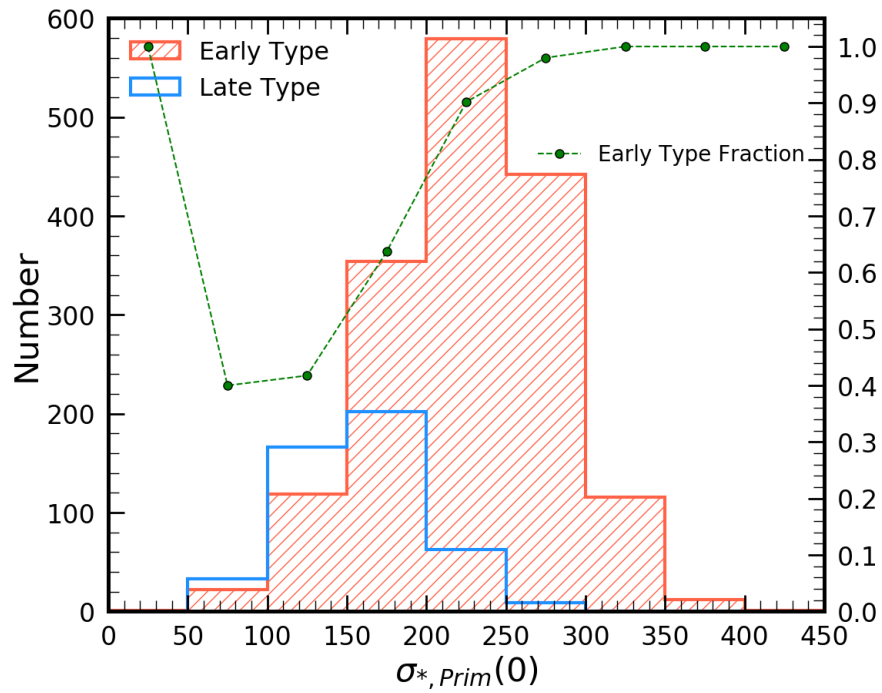
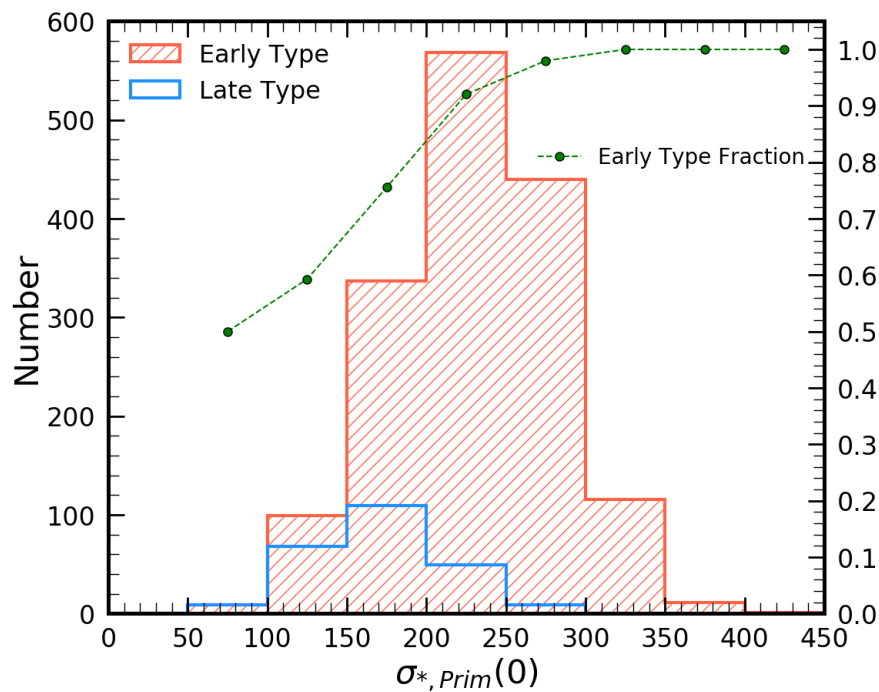


Figure 2.10.  $D_n4000 \geq 1.6$ 인 모은하들의 형태 분류

모은하 부표본 모두 만기형 은하의 영향을 감소할 수 있지만, 두 조건을 모두 만족하는 별형성이 멈춘 적색 모은하 부표본이 만기형 은하의 영향을 크게 줄일 수 있음을 보였다. 이를 통해  $D_n4000$ 과  $(g-r)_0$ 을 이용하여 선별한 부표본을 이용하면  $\sigma_{*, Prim}(0)$ 에 대한 오차가 크게 감소할 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 각 부표본들에 대해 동일한 분석을 수행하여 모든 모은하 표본의 결과와 함께 비교할 것이며, 각 조건을 적용하였을 때의 표본 숫자는 표 2.2에 정리되어있다.



**Figure 2.11.** 별 형성이 멈춘 ( $D_{n4000} \geq 1.6$ ) 적색 ( $(g-r)_0 > 0.85$ ) 모은하 표본에 대한 결과이다.

| Sample Criteria                 | Primary | Satellite |
|---------------------------------|---------|-----------|
| FoF algorithm                   | 3390    | 4218      |
| Matching with $\sigma_{SDSS}$   | 2648    | 3273      |
| Subsample                       |         |           |
| Quiescent [ $D_{n4000} > 1.6$ ] | 2124    | 2692      |
| Red [ $(g-r)_0 > 0.85$ ]        | 1910    | 2457      |
| Red & Quiescent                 | 1830    | 2362      |

**Table 2.2.** 조건에 따라 선별되는 모은하 부표본의 숫자

## Chapter 3

# 결과

### 3.1 위성 은하의 속도 분산 계산( $\sigma_{\text{sat}}$ )

은하군의 시선 방향 속도 분산은 은하군 전체의 질량을 추정할 수 있는 물리량이다 (Watkins et al. 2010). 은하군이 중력적으로 안정되어있다면, 시선 방향의 속도 분산은 은하군 질량에 비례하게 되어있다. 은하군의 시선 방향 속도 분산을 계산하기 위하여, 우리는 먼저 중심 은하와 위성 은하 사이의 상대적인 시선방향 속도 차이 ( $v_{los}$ )를 구하였다:

$$v_{los} = \frac{z(sat) - z(prim)}{1 + z(prim)} * c . \quad (3.1)$$

우리가 계산할 수 있는 시선 방향의 속도 분산은 은하군에 속한 은하들의 3차원적 운동에 의한 속도 분산과는 차이가 있을 수 있다. 은하들이 등방적으로 운동한다면 실제 3차원의 속도 분산  $\sigma_{3-D}$ 와 시선 방향의 속도 분산  $\sigma_{los}$ 사이에는  $\sqrt{3}$ 배 만큼의 차이가 있다. 하지만 많은 경우, 은하군 내에서 은하들이 등방적으로만 운동하지는 않아 시선 방향 속도 분산이 은하군의 실제 속도 분산을 잘 추정하는지 확인할 필요가 있다.

Watkins et al. (2010)은 우리 은하와 안드로메다 (M31) 은하의 위성 은하들을 이용하여 1차원과 3차원 속도 분산 및, 은하군의 질량을 비교하였다. 먼저 시선 방향 속도가 측정된 우리 은하의 위성 은하들의 속도 분산을 구하고, 이를 바탕으로 우리 은하의 질량을 추정하였다. 또한 고유 운동이 알려진 위성 은하들을 이용하여 3차원전 속도 분산 및

이를 바탕으로 한 우리 은하의 질량을 측정하였다. 그 결과, 시선 방향 속도로 구한 우리 은하의 질량의 오차가 크기는 하지만 3차원 속도 분산으로 구한 질량과 오차 범위 내에서 일치함을 보였다. 마찬가지로 M31의 위성 은하를 이용하여 M31의 질량을 측정하였을 때, 시선 방향과 3차원 속도 분산을 사용한 경우의 차이가 미미하였다. 즉 시선 방향 속도만을 이용하여 은하군의 질량을 측정하는 경우, 비록 오차는 크지만 3차원 시선 방향을 이용하여 구한 질량과 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 우리 연구에서는 SDSS 은하군의 고유 운동과 3차원 속도 분산을 구하기 어려우므로, 시선 방향 속도 분산만을 사용하기로 한다.

우리가 연구를 위해 골라낸 은하군 표본의 경우 중심 은하가 거느린 위성 은하의 수가 적다. 이 경우 위성 은하들을 이용하여 속도 분산을 측정하는 경우, 적은 숫자로 인하여 속도 분산의 오차가 커지게 된다. 통계적으로 유의미한 은하군의 속도 분산을 구하기 위해서 여러 은하군을 통합하여 사용하는 것이 필요하다. 은하군 표본을 어떻게 통합하는지에 따라 우리가 계산하는 은하군의 특성이 매우 달라질 수 있다. 이 연구에서는 은하군 중심 은하의 별 속도 분산과 위성 은하로부터 구한 은하의 속도 분산을 구하는 것이므로, 중심 은하의 별 속도 분산에 따라 은하군 표본을 합쳐 사용하기로 한다. 다시 말해, 중심 은하의 별 속도 분산이 비슷한 은하군들을 모아 이 은하군들에 속한 위성 은하들의 특징적 속도 분산을 구하는 것이다. 이를 위해 우리는 중심 은하의 속도 분산을 이용하여 전체 표본을 6개로 나누었다. 각 구간에서 위성 은하와 모은하와의 속도 차이가 큰 위성 은하들은 이상치(outlier)일 수 있기 때문에 시그마 클리핑을 이용하여 분석에서 제외하였다. 따라서 실제로 선별된 샘플보다 분석에 사용된 위성 은하의 숫자는 약간 감소하였다. 표 3.1는 우리가 사용한 중심 은하의 별 속도 분산 구간에 따른 위성 은하의 숫자가 각각 표시되어있다. 우리는 기존의 연구들과 비교하기 위해 모은하의 절대 등급과 항성 질량에 대하여 동일하게 특정 구간으로 표본을 나누어 분석을 진행하였다. 표 3.2은 모은하의 절대 등급 구간별로 분석에 사용된 위성 은하의 숫자를 보여주며, 표 3.3는 모은하의 항성 질량 구간에 따른 위성 은하 개수를 보여주고있다. 아래와 같이 세가지 방법을 사용하여 위성은하의 속도 분산  $\sigma_{\text{sat}}$ 을 계산하였다.

Table 3.1. 모은하 표본의  $\sigma_{*, \text{ Prim}}(0)$ 구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포

| $\sigma_{*, \text{ Prim}}(0)[\text{km s}^{-1}]$ | Subsample |     |      |           |               |
|---|-----------|-----|------|-----------|---------------|
|   | All       | Red | Blue | Quiescent | Red quiescent |
| 50 - 100  | 285       | 33  | 256  | 62        | 22            |
| 100 - 150                                       | 493       | 218 | 272  | 303       | 181           |
| 150 - 200                                       | 706       | 544 | 161  | 631       | 515           |
| 200 - 250                                       | 817       | 783 | 34   | 804       | 776           |
| 250 - 300                                       | 632       | 626 | 6    | 625       | 622           |
| 300 - 450                                       | 205       | 203 | 2    | 201       | 199           |



Table 3.2. 모은하의 절대 등급  $M_r$  구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포

|               | Subsample |     |      |           |               |
|---------------|-----------|-----|------|-----------|---------------|
| $M_r$         | All       | Red | Blue | Quiescent | Red quiescent |
| -19.0 - -20.0 | 60        | 21  | 37   | 28        | 18            |
| -20.0 - -20.5 | 124       | 65  | 56   | 67        | 56            |
| -20.5 - -21.0 | 274       | 151 | 129  | 176       | 144           |
| -21.0 - -21.5 | 521       | 351 | 175  | 390       | 330           |
| -21.5 - -22.0 | 658       | 472 | 181  | 530       | 446           |
| -22.0 - -22.5 | 727       | 595 | 127  | 658       | 582           |
| -22.5 - -23.0 | 511       | 468 | 44   | 493       | 461           |
| -23.0 - -23.5 | 224       | 212 | 12   | 217       | 209           |

Table 3.3. 모은하의 항성 질량  $\log(M_*/M_\odot)$  구간에 따른 위성 은하의 숫자 분포

|                     | Subsample |     |      |           |               |
|---------------------|-----------|-----|------|-----------|---------------|
| $\log(M_*/M_\odot)$ | All       | Red | Blue | Quiescent | Red quiescent |
| 9.0 - 10.0          | 135       | 16  | 116  | 32        | 15            |
| 10.0 - 10.3         | 231       | 70  | 164  | 104       | 61            |
| 10.3 - 10.6         | 496       | 262 | 237  | 343       | 245           |
| 10.6 - 10.9         | 724       | 556 | 168  | 618       | 525           |
| 10.9 - 11.2         | 887       | 826 | 64   | 855       | 808           |
| 11.2 - 11.5         | 499       | 490 | 9    | 488       | 481           |
| 11.5 - 12.5         | 166       | 166 | 0    | 163       | 163           |

### 3.1.1 가우스함수 맞추기

이 방법은 각 구간에 포함된 위성 은하들의  $v_{los}$ 의 분포 히스토그램을 가우스 함수로 맞추어 계산한다. 결과의 오차는 피팅 과정에서 측정된 분산에 대한 RMS 값으로 계산한다. 위성 은하들의 속도 분포가 정규 분포를 따를 경우 가우시안 피팅으로 속도 분산을 계산할 수 있다. 하지만 위성 은하들의 분포가 등방적이지 않은 경우 피팅 결과는 매우 큰 오차를 보일 수 있다. 대표적으로 Wojtak & Mamon (2013)의 연구에서 위성 은하들의 분포가 비등방적이라는 연구 결과를 보여주고 있다. 그림 2.2의  $\Delta v$ 의 히스토그램을 보면  $|\Delta v| > 500 \text{ km s}^{-1}$ 일 때, 평균값 근처에는 가우스함수의 형태에 가깝지만, 편차가 큰 곳에서는 정규분포와 차이가 약간 있음을 알 수 있다.

### 3.1.2 속도 분포의 표준 편차

Danese et al. (1980)에서는 은하단 은하의 속도분포가 가우스 함수꼴임을 가정하고, 은하가 많은 은하단에서 속도 분산을 측정하는 방법을 다음 식을 통해 제시하고있다 (이하 D80)

$$\sigma_{\parallel}^2 = \frac{\sum_i v_{\parallel i}^2}{(n-1)} - \frac{\delta^2}{1 + \bar{V}_{\parallel}/c^2} . \quad (3.2)$$

$\sigma_{\parallel}$ 은 은하들의 시선 방향의 속도 분산을 의미한다.  $v_{\parallel i}$ 는 은하단 중심을 기준으로 한 각 은하의 시선방향의 속도 차이이다. 이는 우리가 사용하는  $v_{los}$ 와 동일한 물리량이다.  $n$ 은 전체 은하의 개수이다.  $\delta$ 는  $v_{\parallel i}$ 의 측정 오차이다.  $1 + \bar{V}_{\parallel}/c^2$ 은 우리가 관측하는 좌표에 대한 보정항이다.

앞서 가우시안 피팅 방법과 마찬가지로 중심 은하의 속도 분산이 비슷한 표본을 이용하여 위성 은하의 속도 분산  $\sigma_{\text{sat}}$ 을 계산하였다. 우리는 Bootstrap resampling을 이용하여  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 오차를 추정하였다.

### 3.1.3 Biweight 방법

마지막으로 biweight 방법 (Beers et al. 1990)을 이용하여 속도 분산을 계산하였다. Biweight 방법은 robust 알고리즘을 사용하여 분포의 대표값(평균, location)과 분산(scale)을 구하는 방법으로서, 표본의 분포가 가우시안 분포를 따르지 않을 때도 적용할 수 있다. 우리가 사용하는 위성 은하의 속도 분포가 정규 분포를 따르지 않을 수 있다. 이 경우 가우시안 피팅을 적용하기는 어려울 수 있으나 biweight를 사용하여 얻어진 결과로부터 통계적인 분석이 가능하다.

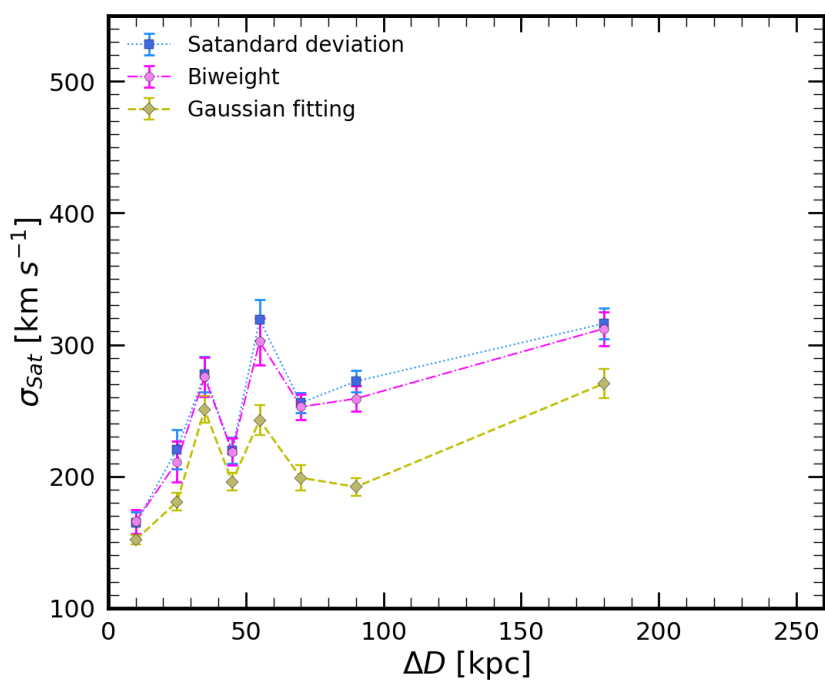
가우시안 피팅과 D80과 동일하게 중심 은하의 별 속도분산을 6개의 구간으로 나누었다. 같은  $\sigma_*$ ,  $\text{Prim}(0)$  범위를 가진 중심 은하들의 위성은하들을 이용하였다. 공개된 astropy 모듈을 이용해 위성 은하들의  $\Delta v$  분포에 biweight 방법을 적용하여 속도 분산을 계산하였다 (Astropy Collaboration et al. 2013, 2018). biweight scale의 오차값은 Bootstrap resampling을 이용하여 추정하였다.

## 3.2 위성 은하의 속도 분산과 모은하로부터의 거리의 관계

### 3.2.1 모든 중심 은하

우리는 그림 2.2에서 모은하로부터의 거리에 따라 위성 은하의 속도  $\Delta v$ 의 분포를 살펴 보았다. 위성 은하의 속도 분포로부터 모은하로부터 떨어진 거리를 각 구간에 대한 속도 분산 값을 계산할 수 있다. 계산된 속도 분산은 암흑 물질 헤일로 질량을 대변할 수 있으며, 거리에 따라 속도 분산값을 살펴보면 암흑 물질 헤일로가 어디까지 분포하는지 추정해볼 수 있다. 암흑 물질 헤일로가 특정 거리보다 멀리까지 존재하지 않는다면 속도 분산이 점차적으로 감소할 것이다.

그림 3.1는 모든 모은하 샘플에 대해 거리에 따른 위성 은하의 속도 분산을 보여주는 결과이다. 본 연구에서 사용된 위성 은하는 대부분 100kpc 안쪽 영역에 위치하고 있다. 100kpc보다 안쪽에 위치한 위성 은하들의 속도 분산을 보면 위아래로 큰 변동은 있어 뚜렷하게 증가하거나 감소하는 경향성이 존재한다고 판단하기 어렵다. 100kpc 이상인 구간은



**Figure 3.1.** 모든 모은하들에 대한 위성 은하 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하로부터의 거리의 관계.

위성 은하의 샘플이 상대적으로 적기 때문에 거리의 구간 260kpc 까지 크게 설정하였으며 정확한 경향성을 나타낸다고 보기는 어렵다. 이는 우리가 선별한 대다수의 위성 은하들이 모은하의 암흑 물질 헤일로 내에 위치하고 있음을 의미한다. 즉 위성 은하 표본들이 암흑 물질 헤일로의 물리량을 충분히 대변할 수 있다.

### 3.2.2 조건에 따른 모은하 부표본의 결과

전체 샘플이 아닌 추가 조건을 적용한 부 샘플에 대한 결과는 그림 3.2, 3.3, 3.4, 3.5에 제시되어 있다.

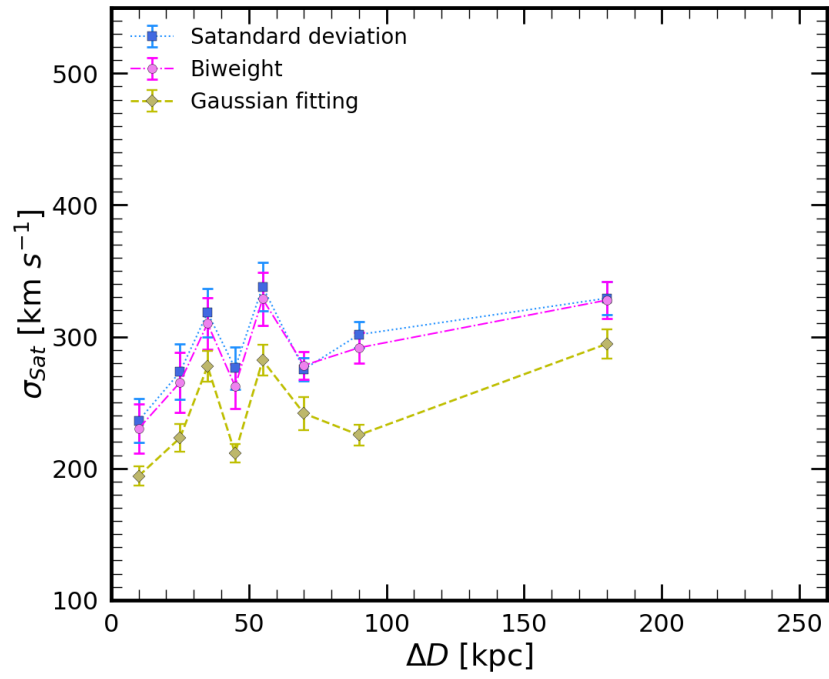


Figure 3.2. 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과

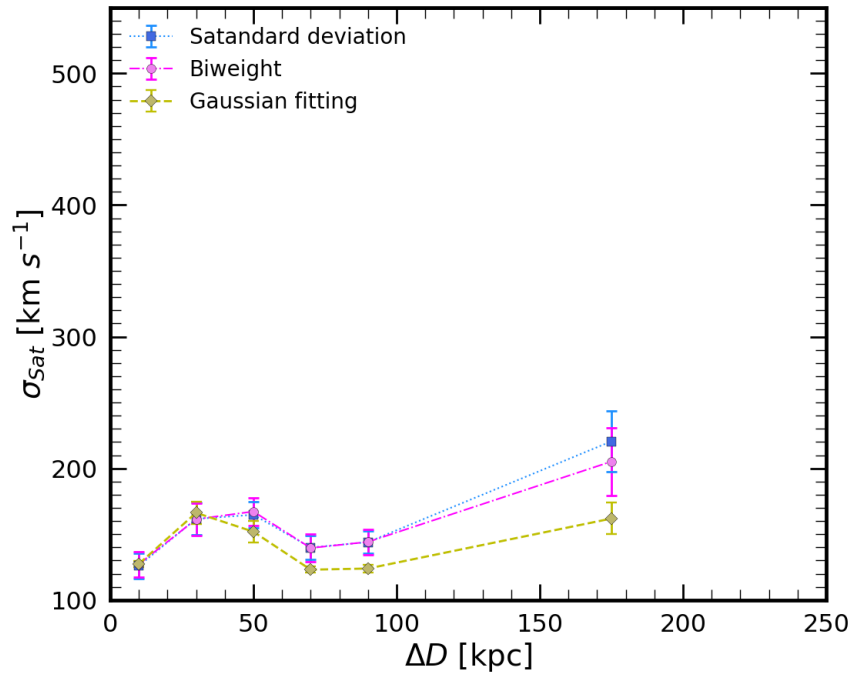


Figure 3.3. 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과

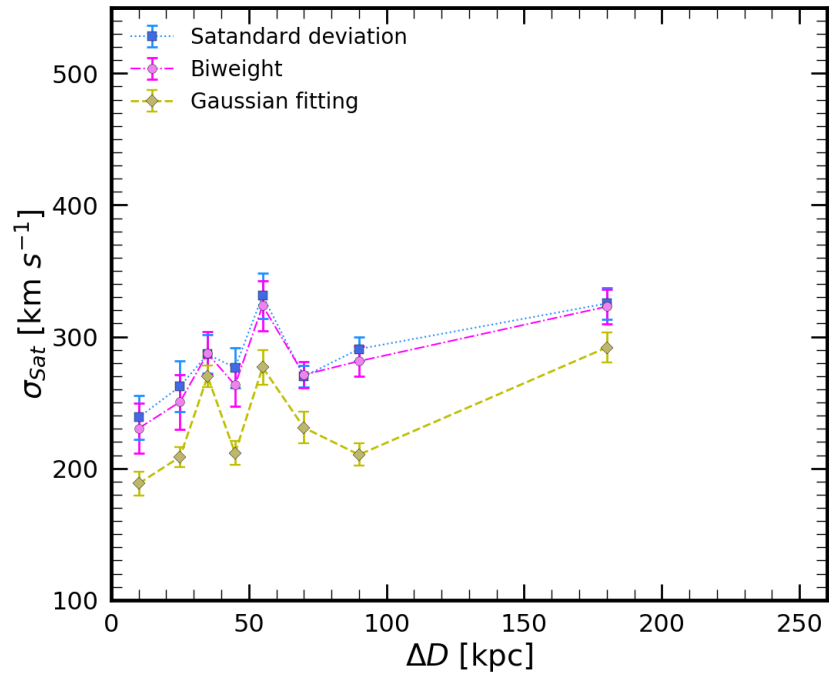


Figure 3.4. 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과

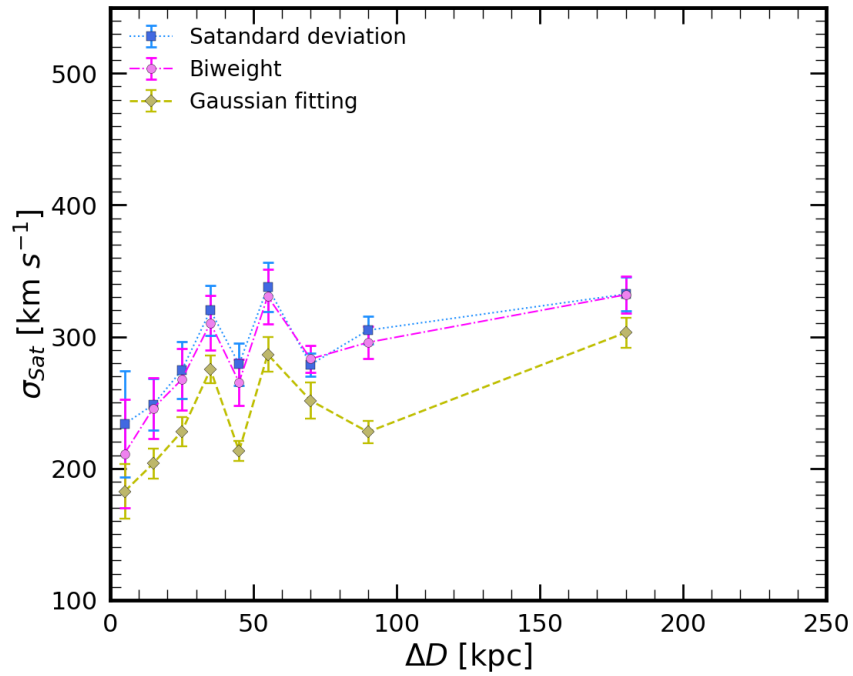


Figure 3.5. 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.1과 동일하게 살펴본 결과

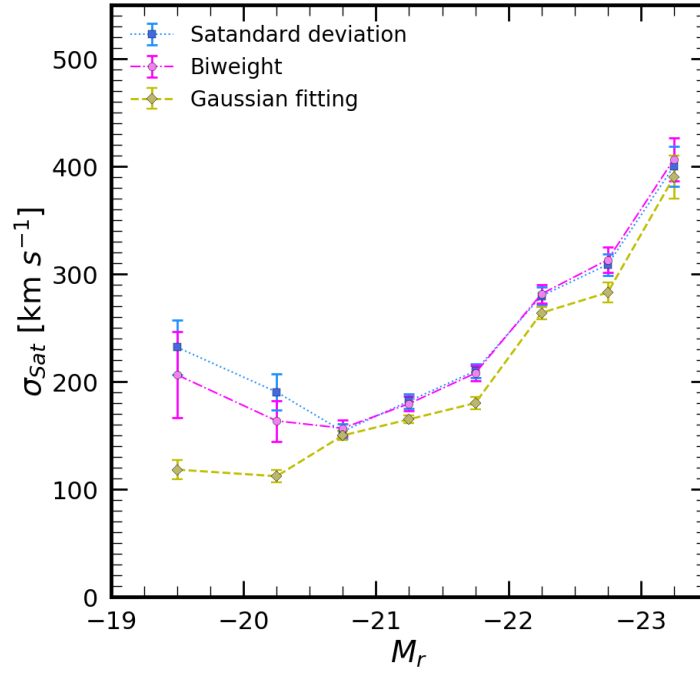
청색 모은하 부 표본은 전 구간에서 위성 은하의 속도 분산 변화가 없다고 볼 수 있다. 청색 모은하 부 표본을 제외한 결과 모두 100kpc보다 가까운 구간에서 위성 은하의 속도 분산 변동이 크게 나타났다. 모든 부 샘플에 대해 살펴본 결과 전체 샘플에서와 마찬가지로 모은하로부터의 거리에 따른 위성 은하 속도 분산의 경향성이 없다. 각 부 샘플의 결과 위성 은하의 속도 분산이 오차 범위 내에서 일정하고, 이는 모두 위성 은하가 모은하 암흑 물질 헤일로 내에 위치하고 있음을 의미한다. 따라서 각 부 샘플을 이용하여 위성 은하의 역학적 분석을 수행할 때, 본 연구에서 사용한 위성 은하들이 모은하 암흑 물질 헤일로의 물리적 특성을 대변한다고 판단할 수 있다.

### 3.3 위성 은하의 속도 분산과 모은하의 절대 등급의 관계

Norberg et al. (2008)은 모은하의 절대 등급  $M_b$ 와 위성 은하의 속도 분산 간의 관계를 보여준다. 은하의 절대 등급 (혹은 밝기)와 위성 은하 속도 분산의 관계에 대해서는 서로 다른 연구 결과들을 보여주고 있다 (McKay et al. 2002; Brainerd, & Specian 2003; Prada et al. 2003; Brainerd 2004; van den Bosch et al. 2004). 본 연구에서 사용한 은하 표본들과 관측된 파장 영역이 다르기 때문에 직접 비교를 하기는 어려우나 동일한 물리량 사이의 관계를 통해 이전의 연구 결과를 보완하고자 한다.



### 3.3.1 모든 중심 은하



**Figure 3.6.** 모든 모은하들에 대해 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하의 r-band 절대 등급의 관계.

그림 3.6은 모든 모은하 표본에 대해서 살펴본 모은하의 절대 등급과 위성 은하 속도 분산의 관계이다.  $M_r$ 이 -21등급보다 어두운 경우에는  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 거의 일정한 모습을 볼 수 있다. 반대로 절대 등급  $M_r$ 이 -21 등급 보다 밝은 구간에서 절대 등급에 따라 위성 은하의 속도 분산이 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 본 연구 결과는 모은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산이 증가한다는 Norberg et al. (2008)의 결과를 부분적으로 보여주고 있다. 이를 통해 모은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산은 비례하는 관계에 있으나 그 비례성이 약하다고 볼 수 있다.

### 3.3.2 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과

2.5장에서  $D_n4000$ 과  $(g-r)_0$  색을 이용하여 모은하의 부 표본을 선별하였다. 조건에 따라 선별된 부 표본에 대해 동일한 분석을 수행하여 모은하의 절대 등급과 위성 은하 속도 분산 사이의 관계를 살펴보고자 한다.

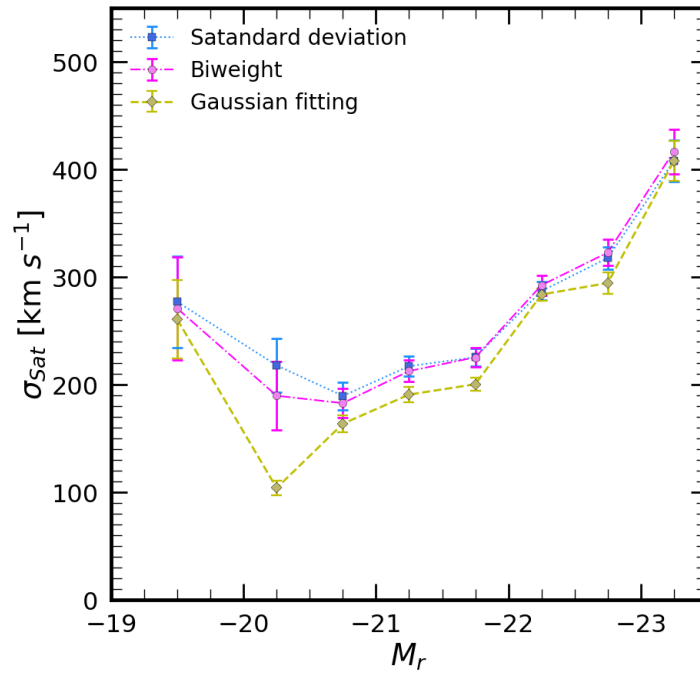
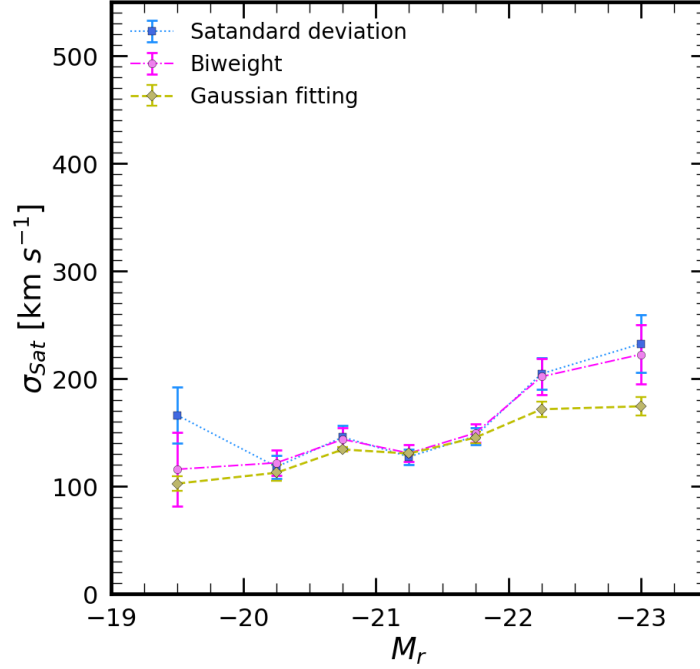


Figure 3.7. 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과.

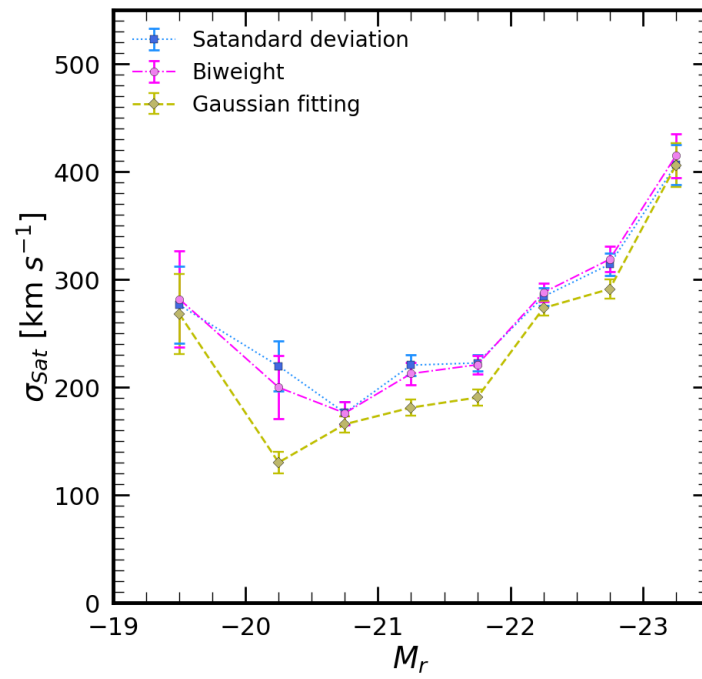
그림 3.7는 적색 모은하 표본들에 대해 살펴본  $M_r$ 과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계이다. 가장 첫 번째의  $\sigma_{\text{sat}}$  결과는 샘플 숫자의 감소로 인하여 오차가 크게 측정되었음을 볼 수 있다. Norberg et al. (2008)의 그림 13에서는 조기형 은하 (타원형 은하와 렌즈형 은하)의 경우 모든 표본을 사용했을 때 보다 모은하의 절대등급과  $\sigma_{\text{sat}}$ 사이의 비례관계가 강해짐을 보였다. 그러나 본 연구에서 살펴본 결과 모든 모은하 표본을 사용했을 때와 큰 차이가 나타나지 않았다. 모든 표본의 결과와 동일하게 적색 모은하 표본 또한 -21등급보다 밝은 절대 등급에서만  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 비례하는 모습이 나타났다.

마찬가지로 Norberg et al. (2008)은 청색 모은하에 표본들의 결과는 약하지만 여전히 절대 등급과  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 비례하는 관계를 보여주고 있는데, 우리의 결과는 그림 3.8과 같다.



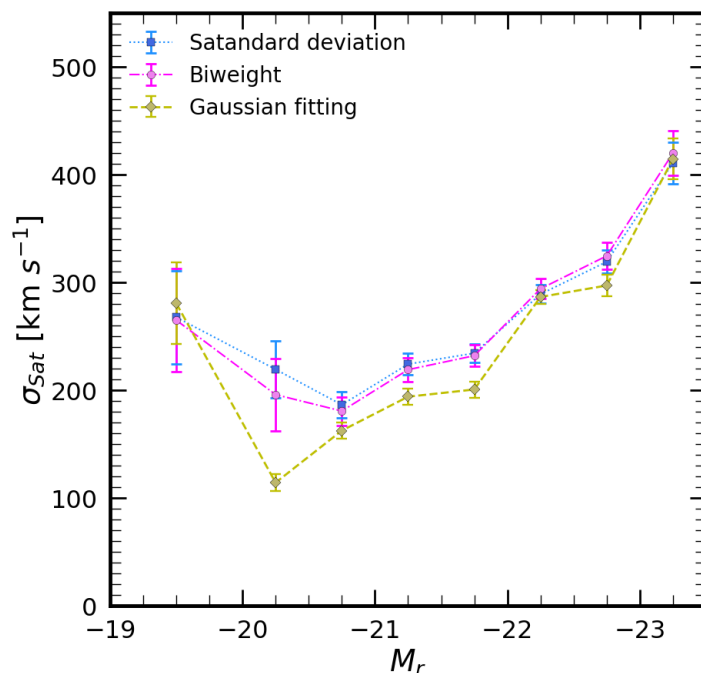
**Figure 3.8.** 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과.

전체 모은하 표본을 사용했을 때 보다 전체적으로  $\sigma_{\text{sat}}$ 가  $200 \text{ km s}^{-1}$  이하로 감소하였으며, 모은하의 절대 등급과  $\sigma_{\text{sat}}$  사이의 상관 관계가 거의 없다. 이전에 비례성이 나타난 -21등급 보다 밝은 경우에도 오차 범위를 고려할 때,  $\sigma_{\text{sat}}$ 와  $M_r$ 이 상관 관계를 가진다고 보기 어렵다. 본 연구에서는  $(g-r)_0$ 의 색을 기준으로 나누었지만 청색 은하 (혹은 만기형 은하)에 대해  $\sigma_{\text{sat}}$ 와  $M_r$ 의 상관 관계가 거의 없다고 볼 수 있으며, 이는 Norberg et al. (2008)에서 제시하는 결과와는 상반된다. 오히려 Brainerd, & Specian (2003)에서 보여준 모은하가 나선 은하일 경우, 절대 등급에 무관하게 위성 은하의 속도 분산이 약  $180 \text{ km s}^{-1}$ 로 일정하게 나타난 결과와 유사하다.



**Figure 3.9.** 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림 3.6과 동일하게 살펴본 결과.

$D_n4000$ 조건을 이용하여 선별한 별 형성이 멈춘 모 은하 표본에 대한 결과는 그림 3.19이다. 이 결과는 적색 모 은하 표본에 대한 결과와 큰 차이가 나타나지 않았다.



**Figure 3.10.** 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.6과 동일하게 살펴본 결과.

마지막으로 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 표본에 대한 결과이다. 그림 3.20는 표본의 숫자가 가장 적지만 조기형 은하의 비율이 가장 높은 표본이다. 이 또한 이전의 표본 (전체 모 은하, 적색 모 은하, 별 형성이 멈춘 모 은하)에 대한 결과와 매우 유사하다.

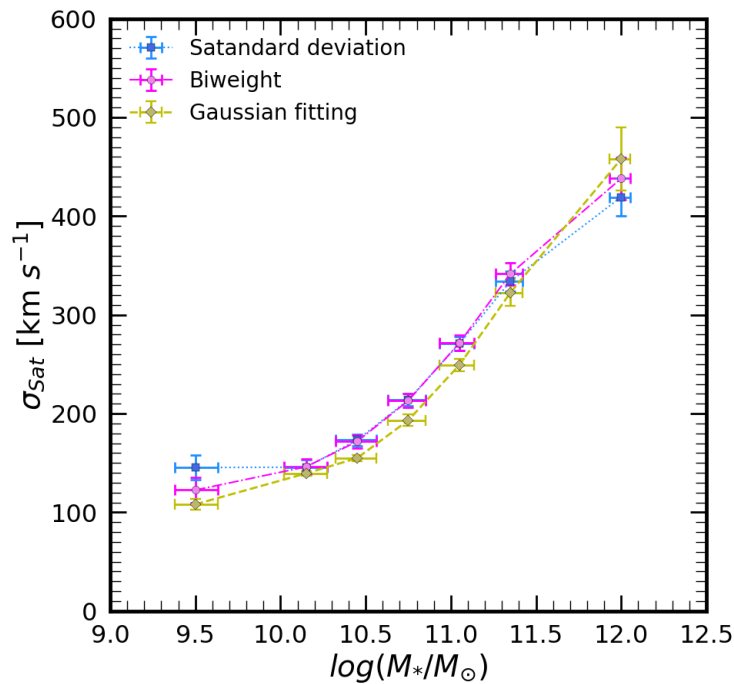
결과적으로 본 연구 결과는 모 은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산  $\sigma_{sat}$ 가 비례하는 모습을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 비례 관계는 적색 모 은하 (혹은 조기형 은하)에서만 나타나며, 청색 은하 (혹은 만기형 은하)에서는 비례 관계가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 Norberg et al. (2008)과는 상이한 결과이다.

### 3.4 위성 은하의 속도 분산과 모 은하의 항성 질량의 관계

기존의 연구에서 은하의 역학적 질량과 관측을 통해 얻을 수 있는 항성 질량 사이의 관계를 제시하였다 (Wojtak & Mamon 2013). 우리는 역학적 질량을 대변하는 물리량으로

$\sigma_{\text{sat}}$ 를 사용하여 선별된 모은하 표본에 대해  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 항성 질량 사이의 관계를 살펴보았다. 3.3장과 마찬가지로 전체 모은하 표본과 선별된 모은하의 부 표본들에 대한 결과를 차례로 살펴본다.

### 3.4.1 모든 중심 은하



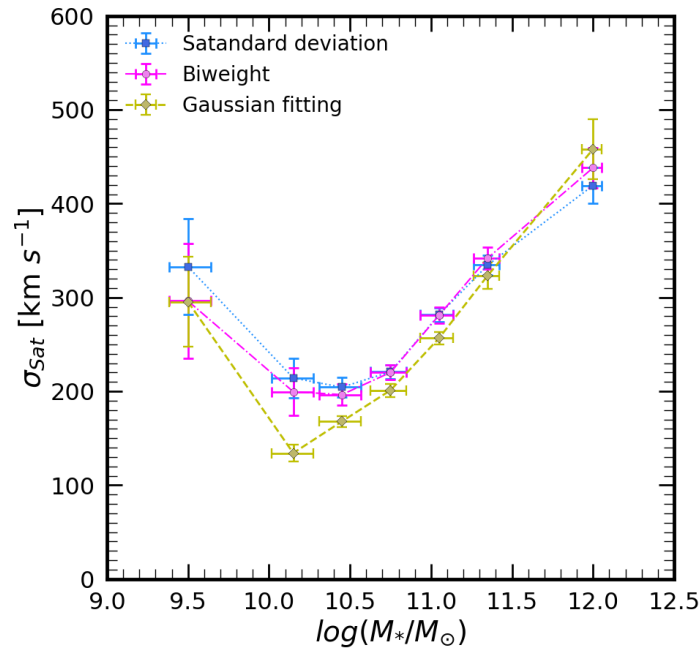
**Figure 3.11.** 모든 모은하들에 대해 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 모은하의 항성 질량의 관계.

그림 3.11은 모든 모은하 표본에 대해 살펴본 항성 질량과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 상관 관계이다. 절대 등급에서 나타난 결과와 다르게 서로 다른 방법으로 계산된  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 굉장히 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다. 또한  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 항성 질량과 좋은 상관 관계를 보여준다. 각 점에 대한 항성 질량의 오차는 구간에 포함되는 모은하 항성 질량 오차의 중간값을 이용하여 표기하였다. 이전의 연구들에서 은하의 항성 질량을 결정하는데에 약 0.3dex의 오차가 있음을 보여주었다 (Fabricant et al. 2013; Zahid et al. 2016a,b). 본 연구에서 분석에 사용된

모은하 표본은 약 0.1-0.2dex의 항성 질량 오차를 보여주고 있다. 그림 3.11의 결과는 항성 질량이 위성 은하의 속도 분산의 좋은 상관관계를 보여주며 이는 암흑 물질 헤일로 질량을 추정하는데에 좋은 상관 관계가 있음을 대변한다.

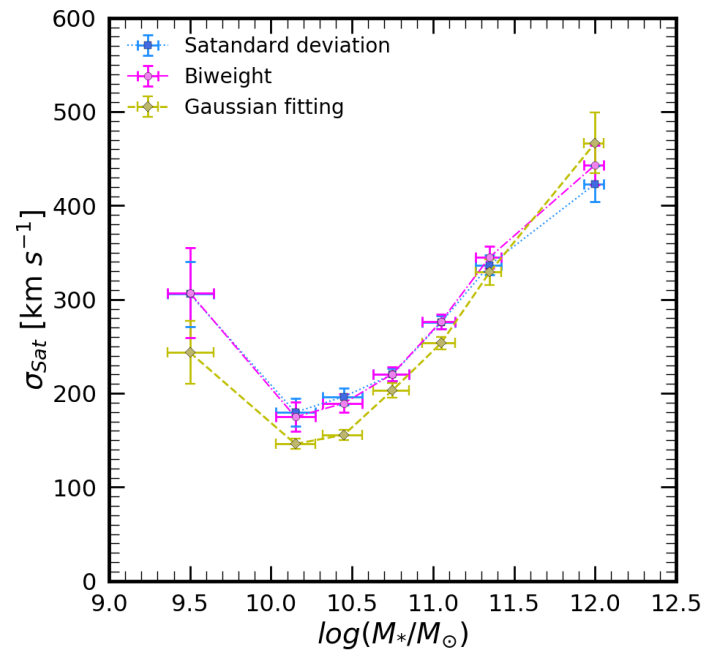
### 3.4.2 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과

절대 등급과 마찬가지로 각 조건에 따른 모은하의 부 표본에 대한 관계를 살펴본다.

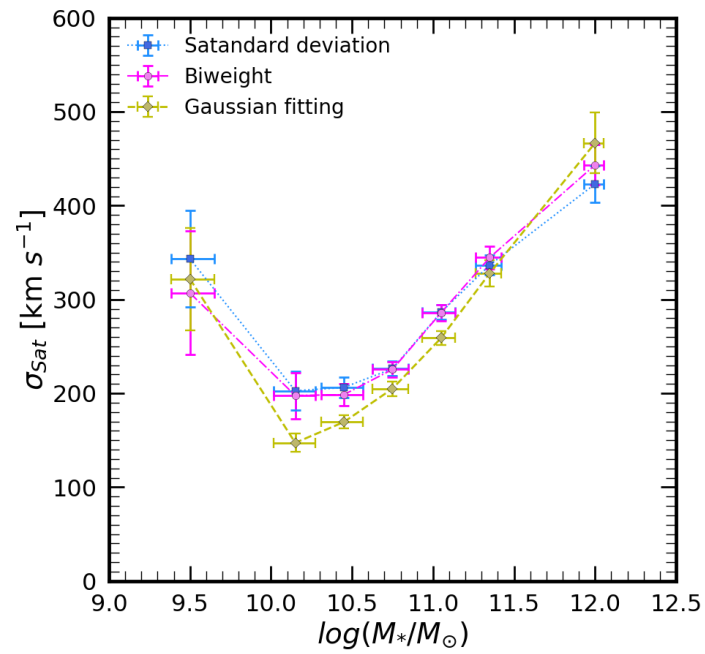


**Figure 3.12.** 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과.

그림 3.12, 3.13, 3.14는 각각 적색 모은하, 별 형성이 멈춘 모은하, 별 형성이 멈춘 적색 모은하 부 표본에 대한 분석 결과이다.  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 항성 질량의 관계에서도 세 가지 부 표본에 대한 결과는 매우 유사한 모습을 보여준다. 세 조건 모두 조기형 은하의 비율을 높게 하기 위한 조건이었기 때문에 선별된 부 표본의 모은하들은 대부분 무거운 조기형 은하이다. 따라서  $\log(M_*/M_\odot) \leq 10.0$ 인 구간에 속하는 모은하의 개수가 적고, 그에 따른 위성 은하의 숫자가 매우 적기 때문에 큰 오차를 보여주고 있지만,  $\log(M_*/M_\odot) > 10.0$ 일 때에는 모은하의 항성 질량과  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 좋은 비례 관계에 있음을 확인할 수 있다.

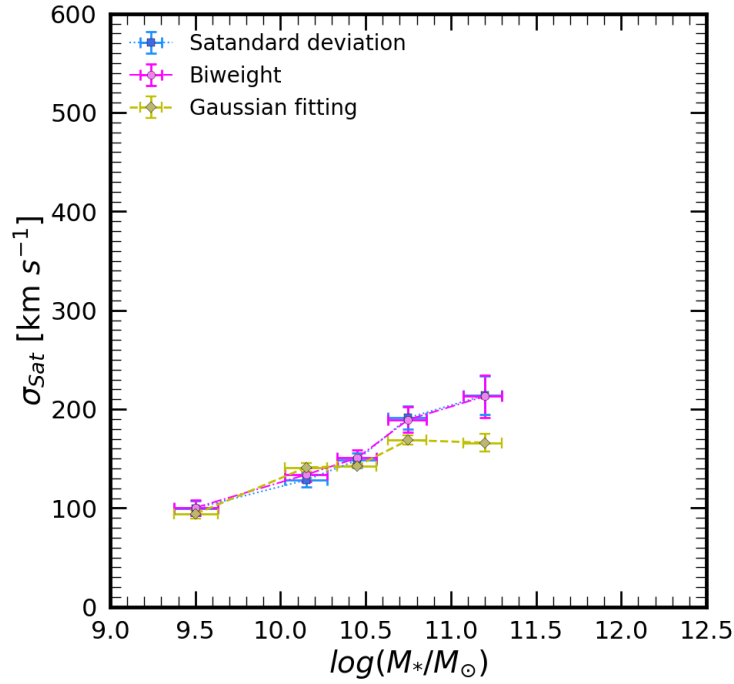


**Figure 3.13.** 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과.



**Figure 3.14.** 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과.





**Figure 3.15.** 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.11과 동일하게 살펴본 결과.

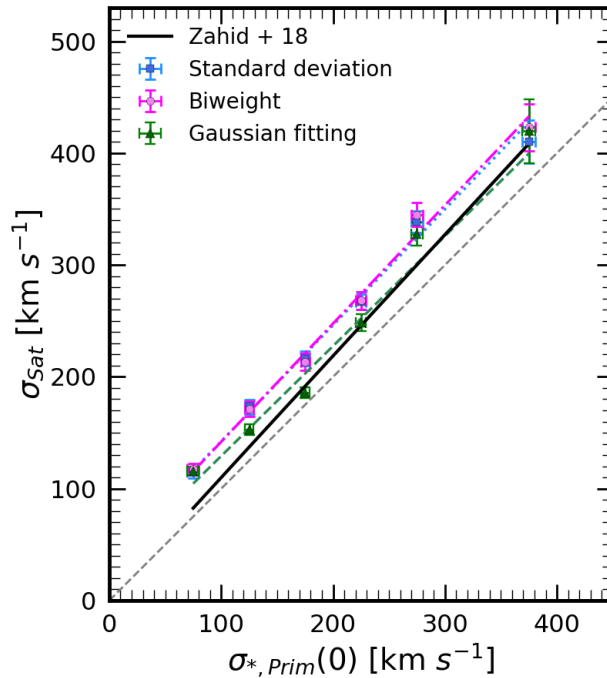
그림 3.15는 청색 모은하 부 표본에 대한 항성 질량과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 상관 관계이다. 청색 은하의 경우 적색 은하보다 질량이 작기 때문에  $\log(M_*/M_\odot) \leq 11.5$  까지만 모은하가 분포하고 있다. 또한  $\log(M_*/M_\odot) \leq 10.0$ 인 모은하가 많이 분포하기 때문에 상대적으로 적은 오차를 보여준다. 청색 모은하 부 표본의 결과 항성 질량 분포 범위의 차이가 있지만  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 비례하는 상관관계를 보여준다. 하지만  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 값이  $100 - 200 \text{ km s}^{-1}$ 에 분포하고 있어 서로 다른 조건으로 정의된 초기형 은하 (적색 모은하, 별 형성이 멈춘 모은하, 별 형성이 멈춘 적색 모은하)의 결과보다 약한 상관 관계를 보여주고 있다.

이번 장에서 살펴본 항성 질량의 경우 3.3장에서 살펴본 모은하의 절대 등급과 마찬가지로  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 비례하는 상관 관계를 보여주었다.

### 3.5 위성 은하의 속도 분산과 모은하의 중심 속도 분산의 관계

마지막으로 본 연구에서는 모은하의 중심 속도 분산  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 과 위성 은하의 속도 분산의 관계를 살펴보았다. 위와 동일하게 전체 표본에 대한 분석과  $(g-r)_0$ 와  $D_n4000$ 을 이용한 부 샘플들에 대해서도 따로 살펴본 결과를 제시한다.

#### 3.5.1 모든 중심 은하



**Figure 3.16.** 모든 중심 은하 표본을 이용하여 살펴본 위성 은하의 속도 분산 ( $\sigma_{\text{sat}}$ )과 중심 은하의 별 속도 분산 ( $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ )의 관계.

그림 3.16은 전체 모은하 표본에 대해서  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 살펴본 결과이다.  $0 < \sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 50 \text{ km s}^{-1}$ 일 때의 결과는 샘플의 숫자가 매우 적어 오차가 크기 때문에 제외하였다. 선별된 위성 은하들 중 시그마 클리핑을 통해 모은하와의 속도 차이가 유별나게 큰 표본들은 제거되었다. 그 결과 각 구간의  $\sigma_{\text{sat}}$  값이  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 굉장히 잘 비례하는 모습을 보여준다. 검은색 실선은 본 연구 결과와 비교할 수 있도록 Zahid et al. (2018)

에서 주어진 식들을 결합하여 나타낸 결과이다. 가우시안 맞춤의 경우 시뮬레이션 결과와 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 속도 분포의 표준 편차와 biweight 방법은 거의 동일한 관계를 보여주고 있다. 각 결과에 대해 선형 함수에 맞추어 상수와 결과에 대한 오차값을 표 3.4에 정리하였다.

| $\sigma_{\text{sat}} = \alpha_{1,a} \times \sigma_{*, \text{Prim}}(0) + \beta_{1,a}$ |                 |                   |       |
|--|-----------------|-------------------|-------|
| Method   | $\alpha_{1,a}$  | $\beta_{1,a}$     | RMS   |
| Standard Deviation   | $1.04 \pm 0.05$ | $38.66 \pm 8.36$  | 9.89  |
| Biweight   | $1.06 \pm 0.05$ | $36.15 \pm 9.10$  | 9.45  |
| Gaussian Fitting   | $0.98 \pm 0.10$ | $30.78 \pm 16.83$ | 15.95 |

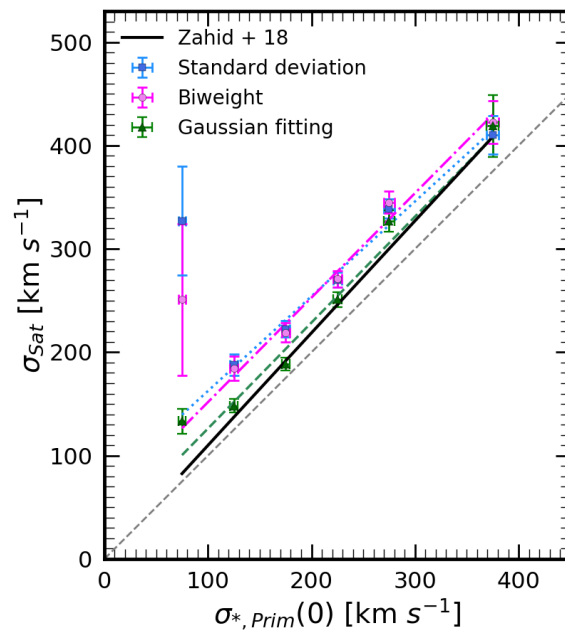
**Table 3.4.** 모든 모은하 표본에 대해  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 결과를 선형 함수에 맞춘 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 a는 모든 샘플을 사용하였다는 뜻의 all을 나타낸다.

세 가지  $\sigma_{\text{sat}}$  결과 모두  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 기울기가 1인 선형 관계를 나타낸다. 영점의 차이가 존재하지만 이는 오차 범위 내에서 동일하므로 모든 모은하 표본을 사용한 결과  $\sigma_{\text{sat}}$ 와  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 는 강한 선형 상관관계를 보여준다는 것을 알 수 있다. 그래프 상에서 가우시안 맞춤의 결과가 Zahid et al. (2018)의 시뮬레이션과 가장 일치하는 듯 보였으나 살펴본 결과 가장 큰 RMS를 가지고 있다. 이는 그림 2.2에서 볼 수 있듯이 위성 은하의 속도 분포가 바깥쪽 부분에서 가우스 함수와 차이를 보여주기 때문인 것으로 보인다. 시그마 클리핑으로 위성 은하의 샘플을 추가 선별하였으나 정규 분포에서 벗어나는 위성 은하들이 여전히 존재하기 때문에 가우시안 맞춤이 가장 큰 RMS를 나타내는 것으로 판단된다.

선형 함수 맞춤을 한 결과 오차 범위 내에서 세 가지의  $\sigma_{\text{sat}}$  모두  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 동일한 선형 상관관계를 나타내고 있다. 이는  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 계산하는 방법에 무관하게  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 강한 상관 관계가 나타난다는 것을 보여준다.

### 3.5.2 조건에 따른 모은하 부 표본의 결과

3.2.2장에서 각 조건에 대한 모은하의 부 표본 모두 위성 은하가 암흑 물질 헤일로에 물리량을 대변할 수 있음을 살펴보았다. 이번 장에서는 각 부 표본에 대한  $\sigma_{*, \text{Prim}(0)}$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 살펴보려고 한다.

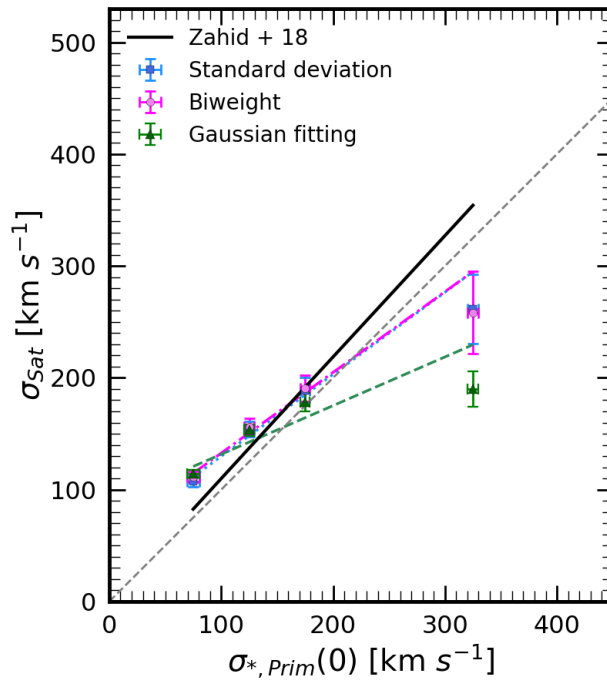


**Figure 3.17.** 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과.

| $\sigma_{\text{sat}} = \alpha_{1,r} \times \sigma_{*, \text{Prim}(0)} + \beta_{1,r}$ |                 |                   |       |
|--|-----------------|-------------------|-------|
| Method   | $\alpha_{1,r}$  | $\beta_{1,r}$     | RMS   |
| Standard Deviation   | $0.92 \pm 0.14$ | $69.92 \pm 31.33$ | 77.33 |
| Biweight   | $1.01 \pm 0.10$ | $50.17 \pm 22.38$ | 51.78 |
| Gaussian Fitting   | $1.03 \pm 0.12$ | $23.58 \pm 22.12$ | 17.70 |

**Table 3.5.** 적색 모은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 r는  $(g - r)_0 > 0.85$ 인 적색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red을 나타낸다.

그림 3.17와 표 3.5는  $(g - r)_0 > 0.85$ 를 만족하는 적색 모은하 표본에 대해 분석한 결과를 보여주고 있다. 우리는 각 조건에 대한 위성 은하의 개수를 표 3.1에서 확인할 수 있다. 적색 모은하들을 이용하였을 때,  $50 < \sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 100 \text{ km s}^{-1}$ 구간에 포함된 위성 은하는 총 33개이다. 위성 은하의 숫자가 그림 3.17의 첫번째 biweight와 속도 분포의 표준편차의 결과가 크게 나오는 이유이다. 가우시안 맞춤의 경우는 오차 범위가 작으나 모든 샘플을 사용했을때 보다 값이 크게 측정된 이유 또한 위성 은하 숫자의 급격한 감소 때문으로 보여진다. 오차 범위를 고려한 선형 함수 맞춤의 결과 여전히  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$  사이의 강한 선형적 상관 관계가 보여지고 있다. 첫 번째 결과가 전체 선형 관계보다 매우 크게 측정되었기 때문에, 영점에 해당하는  $\beta_{1,r}$  값과 RMS 값이 이전보다 큰 값을 보여주고 있다. 그럼에도 두 물리량 사이의 기울기 ( $\alpha_{1r}$ )는 오차 범위내에서 모든 모은하 표본으로 살펴본 결과인 1과 동일하다.



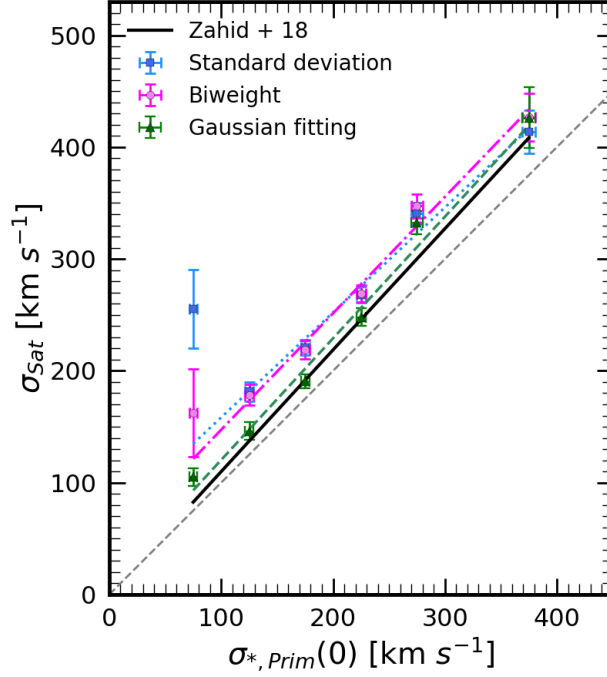
**Figure 3.18.** 청색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과.

| $\sigma_{sat} = \alpha_{1,b} \times \sigma_{*, Prim(0)} + \beta_{1,b}$ |                 |                   |       |
|--|-----------------|-------------------|-------|
| Method   | $\alpha_{1,b}$  | $\beta_{1,b}$     | RMS   |
| Standard Deviation   | $0.73 \pm 0.10$ | $56.36 \pm 11.68$ | 17.14 |
| Biweight   | $0.72 \pm 0.09$ | $60.49 \pm 10.96$ | 18.76 |
| Gaussian Fitting   | $0.44 \pm 0.15$ | $88.12 \pm 18.37$ | 21.96 |

**Table 3.6.** 청색 모 은하 부표본에 대해 표3.4와 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 b는  $(g-r)_0 \leq 0.85$ 인 적색 모 은하 표본을 사용하였다는 뜻의 blue을 나타낸다.

그림 3.18와 표 3.6는  $(g-r)_0 \leq 0.85$ 를 만족하는 청색 모 은하 표본에 대해 분석한 결과를 보여주고 있다. 청색 모 은하 표본의 결과 또한  $\sigma_{*, Prim(0)}$ 와  $\sigma_{sat}$ 가 비례하는 관계를 보여주고 있다. 그러나 두 물리량 사이의 비례 관계가 적색 모 은하 표본보다 약한 모습을 확인할 수 있다. 청색 모 은하 표본을 이용한 경우 표준 편차와 biweight 방법은

0.72, 가우시안 맞춤은 0.44의 서로 다른 기울기를 보여준다. 또한 적색 모은하 표본들의 비례 기울기인 1보다 작은 비례 관계를 갖고 있다.



**Figure 3.19.** 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 그림 3.16과 동일하게 살펴본 결과.

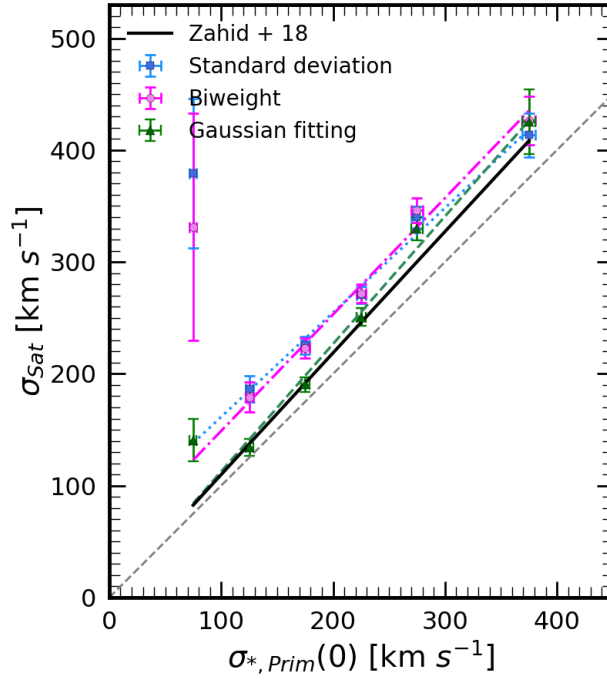
| $\sigma_{sat} = \alpha_{1,q} \times \sigma_{*, Prim(0)} + \beta_{1,q}$ |                 |                   |       |
|--|-----------------|-------------------|-------|
| Method   | $\alpha_{1,q}$  | $\beta_{1,q}$     | RMS   |
| Standard Deviation   | $0.94 \pm 0.13$ | $64.42 \pm 28.17$ | 50.06 |
| Biweight   | $1.04 \pm 0.08$ | $43.17 \pm 17.56$ | 19.21 |
| Gaussian Fitting   | $1.09 \pm 0.08$ | $11.52 \pm 15.11$ | 12.02 |

**Table 3.7.** 별 형성이 멈춘 모 은하 부표본에 대해 표 3.4와 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 q는  $D_n4000 \geq 1.6$ 인 모 은하 표본을 사용하였다는 뜻의 quiescent를 나타낸다.

세 번째 결과는 그림 3.19와 표 3.7이다. 이는  $D_n4000 \geq 1.6$ 를 만족하는 별 형성이 멈춘

모은하 표본에 대해 분석한 결과를 보여주고 있다. 별 형성이 멈춘 모은하 표본들을 사용한 결과는 적색 모은하와는 다르게 첫 번째 구간이 크게 나타나지 않는다. 이는 적색 모은하 표본 (33개)보다 더 많은 위성 은하 (62개)를 포함하고 있기 때문에 표본 숫자의 증가로 오차가 크게 감소한 것으로 보인다. 표 3.7에 제시된 선형 함수에 맞춘 상수들의 결과를 살펴보면 별 형성이 멈춘 은하의 경우 기울기  $\alpha_{1,q}$ 가 오차 범위 내에서 1의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 적색 모은하 표본을 사용했을 때 보다 RMS는 감소하였다. 전체 모은하 표본의 결과와 비교하면 샘플 숫자의 감소로 인해 RMS 값이 크게 나타나고, 가우시안 맞춤의 경우는 예외적으로 전체 표본의 결과와 유사한 RMS 값을 보여준다.





**Figure 3.20.** 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 그림3.16과 동일하게 살펴본 결과.

| $\sigma_{sat} = \alpha_{1,r\&q} \times \sigma_{*, Prim(0)} + \beta_{1,r\&q}$ |                   |                   |       |
|--|-------------------|-------------------|-------|
| Method   | $\alpha_{1,r\&q}$ | $\beta_{1,r\&q}$  | RMS   |
| Standard Deviation   | $0.93 \pm 0.15$   | $68.10 \pm 33.14$ | 98.70 |
| Biweight   | $1.04 \pm 0.11$   | $44.82 \pm 24.75$ | 85.45 |
| Gaussian Fitting   | $1.14 \pm 0.12$   | $-1.39 \pm 24.13$ | 24.58 |

**Table 3.8.** 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 부표본에 대해 표3.4과 동일하게 살펴본 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 rq는  $D_n4000 \geq 1.6$ 와  $(g-r)_0 > 0.85$  를 모두 만족하는 모 은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red quiescent를 나타낸다.

마지막으로  $D_n4000$ 과  $(g-r)_0$ 의 조건을 모두 사용한 별 형성이 멈춘 적색 모 은하 표본에 대한 결과이다.  $D_n4000 \geq 1.6$ 과  $(g-r)_0 > 0.85$ 의 조건을 모두 적용하였기 때

문에 분석에 사용된 표본의 숫자는 가장 적다. 그림 3.20은 적색 모은하 표본을 사용한 그림 3.17와 유사하게 가장 첫 번째  $\sigma_{\text{sat}}$  결과 값은 큰 오차를 보여주며 크게 측정되었음을 보여준다. 표본의 수가 가장 적으며, 첫 번째  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 측정 값으로 인해 RMS값 또한 가장 크게 측정되었음을 표 3.8에서 확인할 수 있다. 그림에도  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 비례하는 기울기  $\alpha_{1, rq}$ 는 표준 편차와 biweight는 1의 기울기를 보여주며, 가우시안 맞춤은 1보다 약간 큰  $1.14 \pm 0.12$  값을 보여준다.

이번 장에서는 모은하의 부 샘플들에 대한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 살펴보았다. 청색 모은하 부 샘플의 결과를 제외하면 모든 조건에 대해서  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 영점의 차이를 두고 1대1로 비례하는 상관관계를 확인할 수 있었다. 샘플의 숫자가 적은  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0) \leq 100 \text{ km s}^{-1}$ 인 경우를 제외하면 모든 구간에서는 선형 함수에 맞춘 결과와 굉장히 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 따라서 우리는  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 강한 선형의 상관 관계가 있는 물리량임을 확인할 수 있다.



## Chapter 4

# 토의

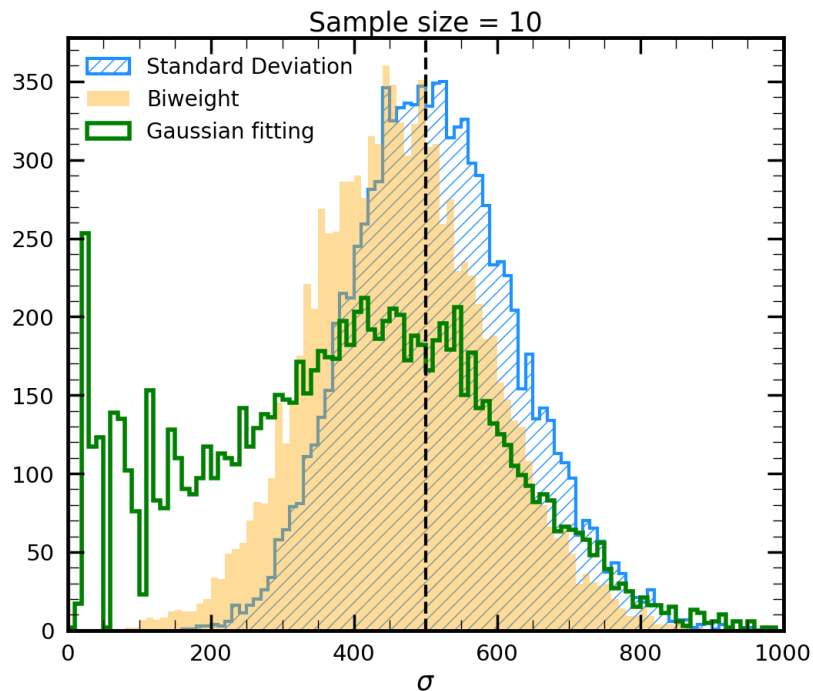
우리는 SDSS DR12에서 뽑힌 중심 은하와 2등급 이상의 밝기 차이가 나는 위성 은하들로만 구성되어있는 은하 표본을 구성하였다. 이 표본을 이용하여 우리는 위성 은하로 측정한 은하 은하들의 속도 분산과 중심 은하의 별 속도 분산 사이에 좋은 상관 관계가 있음을 보였다. 이 결과는 중심 은하의 속도 분산이 은하 전체의 질량과 비례함을 나타낸다. 이번 장에서는 먼저 은하의 속도 분산을 구하는 방법에 따라 우리의 결과 영향을 받는지 4.1장에서 살펴본다. 4.2장에서는 이전 연구들에서 제시된 다른 물리량들과 암흑 물질 헤일로 질량의 관계를 살펴본다. 4.3 시뮬레이션의 결과와 우리의 관측 연구 결과를 비교하였다.

### 4.1 세 가지 $\sigma_{\text{sat}}$ 결과

본 연구에서는 속도 분포의 표준편차, biweight, 가우시안 맞춤 총 세가지의 방법으로  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 계산하였다. 모든 위성 은하의 분포를 나타낸 그림 2.2에서 선별된 위성 은하들의 속도 분포 히스토그램을 확인할 수 있다. 모은하와의 속도 차이가 작은 경우 정규 분포와 잘 일치하지만, 속도 차이가  $500\text{km s}^{-1}$ 보다 큰 경우 연구에 사용된 위성 은하 표본들이 정규 분포와 차이가 있음을 알 수 있다. 전체적인 표본에서 정규 분포와의 차이가 있기 때문에 우리는 추가적으로 시그마 클리핑을 통해 위성 은하의 이상치를 제거하였다. 그림에도 세 방법간의 차이가 여전히 존재하는데, 이를 확인하기 위해 우리는 다음과 같은 방법을

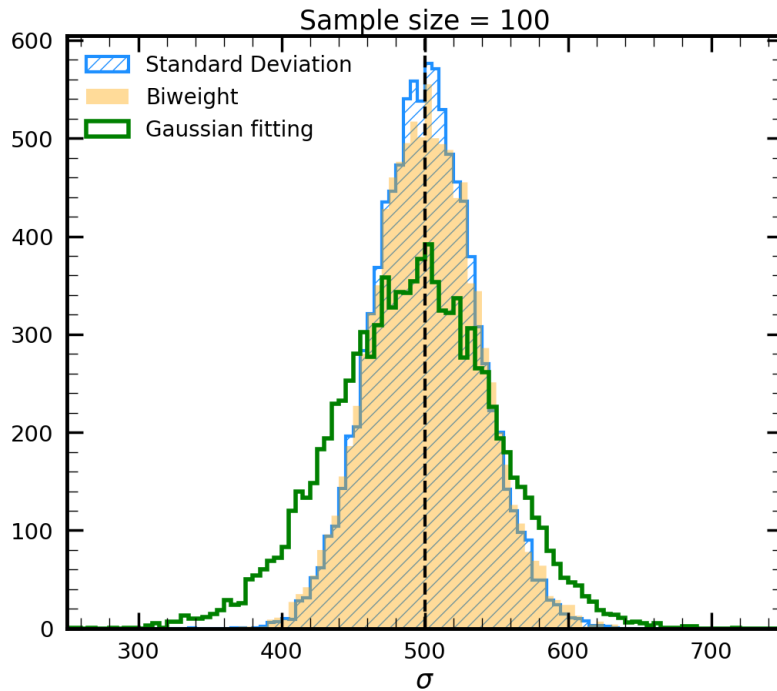
수행하였다.

각 구간에 사용된 위성 은하의 수에 따라 세 결과의 차이를 확인하기 위해 평균은 0이며, 분산이 500인 무작위의 분포를 가정하였다. 표본의 숫자가 각각 10개, 100개, 500개 일 때 10000번의 반복을 통해 세가지 방법 (표준편차, biweight, 가우시안 맞춤)에 따라 추정된  $\sigma_{\text{sat}}$  결과값의 분포를 살펴보았다.



**Figure 4.1.** 표본의 개수가 10개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위.

그림 4.1은 표본의 숫자가 매우 적은  $n = 10$ 인 경우에 대해 시험해 본 결과이다. 세 방법 중 가우시안 맞춤의 결과는 참 값인 500을 기준으로 굉장히 넓게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 표준 편차나 biweight 방법의 경우는 분산이 적으나 참 값인 500에서 약간 벗어나 있는 모습을 볼 수 있다. 이는 우리가 사용하는 위성 은하 표본의 개수가 적은 경우 세가지 방법 모두 참 값에서 크게 벗어날 수 있음을 보여준다. 특히 가우시안 맞춤의 경우에는 참 값에서 크게 벗어날 수 있다.

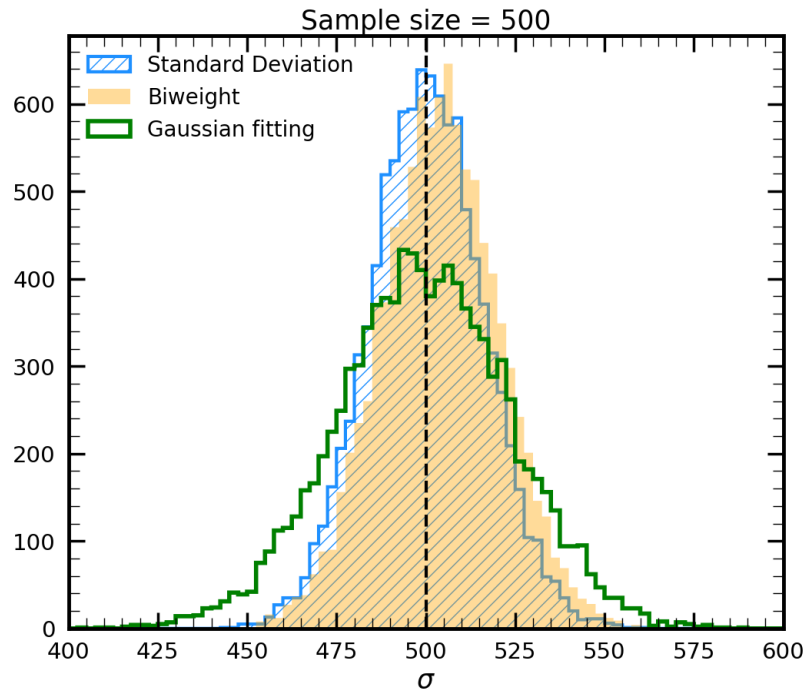


**Figure 4.2.** 표본의 개수가 100개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위.

표본의 개수  $n = 100$ 일 때의 결과는 그림 4.2에서 볼 수 있다. 표본의 개수가 증가함에 따라 분산의 분포 범위가 감소함을 볼 수 있다. 세 방법 모두 참값을 기준으로 분포하나 가우시안 맞춤의 경우 여전히 더 넓은 범위에 걸쳐 분산값이 분포함을 보여준다.

표본의 개수가 500개로 증가한 결과 그림 4.3을 살펴보면 분포의 범위가 더 감소한 모습을 볼 수 있다. 참값에서 약간 벗어나지만 표준 편차와 biweight 방법은 참 값을 잘 추정한다고 볼 수 있다. 그러나 가우시안 맞춤의 경우 참값을 중심으로 이중 분포의 모습을 보여주며, 더 넓은 범위에 걸쳐  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 추정할 수 있음을 확인하였다.

이를 통해 우리는 표본의 숫자가 충분하지 않을 경우 세 방법 모두  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 참 값을 추정하는데 큰 어려움이 있음을 알 수 있다. 표본의 개수가 증가할 수록 세 방법 모두 참 값에 가까운  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 추정할 수 있으나 가우시안 맞춤의 결과는 다른 두 방법 (표준 편차와 biweight)에 비해 더 오차가 크게 나타날 수 있음을 보여주었다.



**Figure 4.3.** 표본의 개수가 500개 일 때, 10000번의 무작위 속도 분포에 대한  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 분포 범위.

3장에서  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 모은하의 여러 물리량간의 상관 관계를 살펴보았다. 결과 그래프 상에서 몇몇 값들은  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 계산하는 방법에 따라 큰 차이가 존재한다. 큰 오차범위와 함께 다른 값을 보이는 경우가 있다. 이는 표본의 개수가 충분히 많지 않아  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 결과가 그림 4.1와 같이 넓기 때문에 나타나는 차이로 볼 수 있다.

계산하는 방법에 따라  $\sigma_{\text{sat}}$ 는 약간의 차이를 보여준다. 그러나 충분히 많은 표본 숫자가 확보된다면  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 계산하는 방법에 관계없이 비교하는 모은하의 물리량과 나타나는 상관관계는 거의 동일하다. 따라서 우리가 살펴본  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 모은하 물리량의 상관 관계는 방법에 무관하게 나타나는 은하의 특성이라고 판단할 수 있다.

## 4.2 위성 은하의 속도 분산과 모은하 물리량의 상관 관계

우리는 위성 은하의 속도 분산과 다음의 총 세가지의 모은하 물리량의 상관 관계를 살펴 보았다. 모은하의 절대등급, 항성 질량, 그리고 중심 속도 분산이다. 이번 장에서는 각각의 결과를 이전의 연구 (Norberg et al. 2008; Wojtak & Mamon 2013)와 비교 분석한다. 추가적으로 본 연구에서 새롭게 제시한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 시뮬레이션과 비교하여 실제 암흑 물질 헤일로 질량을 추정된 결과를 살펴본다 (Zahid et al. 2018)

### 4.2.1 중심 은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산의 관계

Norberg et al. (2008)은 2dFGRS (2dF Galaxy Redshift Survey)로부터 독립된 밝은 은하와 어두운 위성 은하들로 이루어진 은하 표본을 선별하였다. 밝은 주 은하를 중심으로  $400 h^{-1} \text{ kpc}$  반지름을 가지며 시선 방향의 속도가  $\Delta V = |V^{\text{prim}} - V^{\text{sat}}| \leq 1200 \text{ km s}^{-1}$ 를 이용하여 특정 원통을 가정한다. 원통 내에 주 은하보다 2.2등급 이상 어두운 은하들을 위성은하로 선별하였다. 최종적으로 그들은 2dFGRS가 관측한 실제 공간을 기준으로 총 750개의 중심 은하와 1241개의 위성 은하를 선별하였다. Norberg et al. (2008)의 그림 13에서  $-21.5 < M_{b,j} \leq -19.0$  범위에서 중심 은하의 절대등급  $M_{b,j}$ 와 위성 은하의 속도 분산  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 비례하는 관계를 보여주고 있다. 동일한 그림에서 그들의 결과 뿐만 아니라 유사한 연구를 수행한 이전 연구들과의 결과를 비교하여 함께 보여주고 있다 (McKay et al. 2002; Brainerd, & Specian 2003; Prada et al. 2003; Brainerd 2004; van den Bosch et al. 2004).

Norberg et al. (2008)은 모은하의 절대 등급과 위성 은하 속도 분산이 강하게 비례한다는 결과를 제시하였다. 반면에 van den Bosch et al. (2004)는 특정 구간에서만 두 물리량이 비례한다는 결과를 제시하였고, Brainerd (2004)는 나선 은하의 경우 모은하의 절대 등급과 위성 은하 속도 분산사이에 전혀 상관 관계가 없음을 보여주었다. 본 연구의 결과는 3.3장에서 살펴본 것과 같이 모은하의 절대 등급이 -21보다 밝은 경우에 대해서만 비례 관계를 보여주었다. 청색 모은하 표본의 경우에는 절대 등급과  $\sigma_{\text{sat}}$ 사이의 상관



관계가 매우 거의 없음을 볼 수 있다 (그림 3.8).

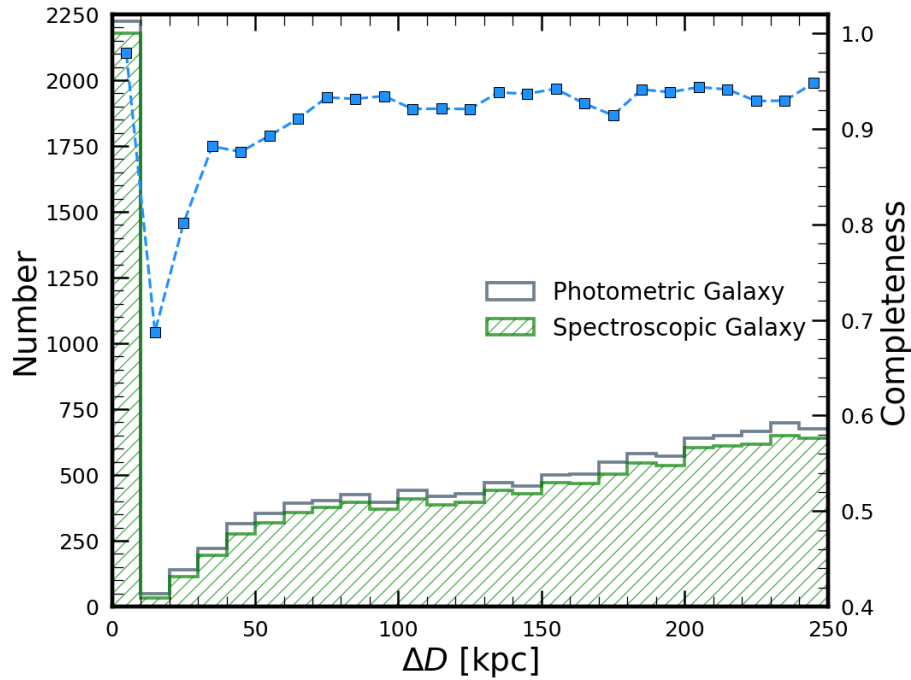
Norberg et al. (2008)은  $M_{bj}$ 를 이용하여 암흑 물질 헤일로 질량을 추적할 수 있음을 보여주고 있다. 하지만 우리가 살펴본 그림 3.6의 특정 구간과 몇몇의 이전 연구들에서는 중심 은하의 절대 등급이 위성 은하의 속도 분산과 비례하지 않을 수 있음을 보여준다 (van den Bosch et al. 2004; Brainerd, & Specian 2003). 이를 종합하여 보았을 때, 은하의 절대 등급과  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 비례한다고 하여도 관계의 차이가 다양할 수 있음을 알 수 있다. 결국  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 모은하의 절대 등급이 약한 상관 관계를 보여준다는 것을 의미한다. 암흑 물질 헤일로의 질량을 추적하기 위해 중심 은하의 절대등급을 사용하는 것은 부정확하며 경우에 따라 불가능 할 수 있다. 따라서 모은하의 절대 등급보다  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 좋은 상관 관계를 보이는 다른 물리량을 고려하여야한다.

#### 4.2.2 항성 질량과 위성 은하의 속도 분산의 관계

Wojtak & Mamon (2013)은 7번째로 공개된 SDSS DR7를 이용하여 독립된 중심 은하와 어두운 위성 은하들로 구성된 은하 표본들을 선별하였다. 사용한 조건은 다르지만 Norberg et al. (2008)의 방법과 유사하게 중심 은하를 기준으로 원통을 가정하여 위성 은하들을 선별하였다. 중심 은하를 선별하기 위하여  $M_r < -19.0$ 과  $3000 < cz < 25000 \text{ km s}^{-1}$ 의 조건을 사용하였다. 위성 은하를 선별하기 위하여 중심 은하를 기준으로  $\Delta D < 1 \text{ Mpc}$ ,  $\Delta v_{\text{los}} < 1500 \text{ km s}^{-1}$ 인 원통을 가정하였고,  $M_r > 1.505$ 인 조건을 이용하였다. Wojtak & Mamon (2013)은 중심 은하의 항성 질량과 헤일로의 질량 사이의 관계를 그림 8에서 보여주고 있다. 중심 은하를 색에 따라 적색형 은하와 청색형 은하로 구분하였다. 은하의 색과 관계 없이 전체적으로 중심 은하의 항성 질량과 헤일로의 질량이 원만하게 비례하고 있음을 볼 수 있다. 사용된 표본의 수는 적색형 중심 은하 3800개이며, 위성 은하의 개수는 8800개이다. 청색형 중심 은하는 총 1600개이며, 위성 은하의 개수는 2600개이다.

우리는 Wojtak & Mamon (2013)의 결과와 3.4장에서 살펴본 모은하의 항성 질량과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 비교하고자 한다. 가장 먼저 분광 관측의 완결성을 비교한다. Wojtak & Mamon (2013)의 그림 3은 이들이 선별한 독립된 중심 은하들에 대해 분광 관측의 완결성

을 보여준다. 천구상 투영된 거리가 중심 은하에서 가까울수록 분광 관측의 완결성이 크게 감소하는 모습을 볼 수 있다.



**Figure 4.4.** 중심 은하를 기준으로 하여 천구상 각거리 간격마다 고리로 영역을 설정하였다. 설정한 영역 내에 측광이 수행된 모든 은하들 중 분광 관측이 수행된 은하들의 비율을 계산한 결과이다. 천구상 투영된 각거리는 중심 은하까지의 거리에 중심 은하로부터 떨어진 각거리를 곱하여 계산하였다. 회색과 초록색의 히스토그램은 각각  $\Delta D$  구간에서 측광 관측과 분광 관측이 수행된 은하들의 개수 분포이다. 푸른색은 초록색 히스토그램과 회색 히스토그램 사이의 비율로 분광 관측 완결성을 나타내고 있다.

그림 4.4는 본 연구에서 사용된 은하 표본의 분광 관측 완결성을 비교한 결과이다. 중심 은하로부터 떨어진 거리  $\Delta D$ 에 대해  $0 < \Delta D \leq 250$  kpc까지 완결성이 0.8 이상인 모습을 볼 수 있다. Wojtak & Mamon (2013)의 그림 3의 결과와 비교해보면  $\Delta D \leq 60$  kpc범위에서 0.6 이하로 분광 관측의 완결성이 감소하는 모습을 볼 수 있다. 우리가 선별한 은하 표본의 개수는 적으나 Wojtak & Mamon (2013)의 표본에 비해 더 높은 분광 관측 완결

성을 가지고 있다. 이로 인하여 분석 과정에서 중심 은하와 가까이 위치한 위성 은하들이 누락되었을 가능성이 높다. 우리의 표본을 이용하면 중심 은하와 천구상 가까이 투영된 위성 은하들의 효과까지도 반영할 수 있다.

이번 장에서는 각각의 부 표본에 대해 비교하지 않고, 모든 모은하를 사용한 결과만을 비교하도록 하겠다. 비교를 위해 그림 3.11의  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 암흑 물질 헤일로 질량으로 변환하여야 한다. 이를 위해 Rines et al. (2013)에서 제시한 결과를 이용하여 아래 식과 같이  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $M_{200}$ 으로 변환하였다

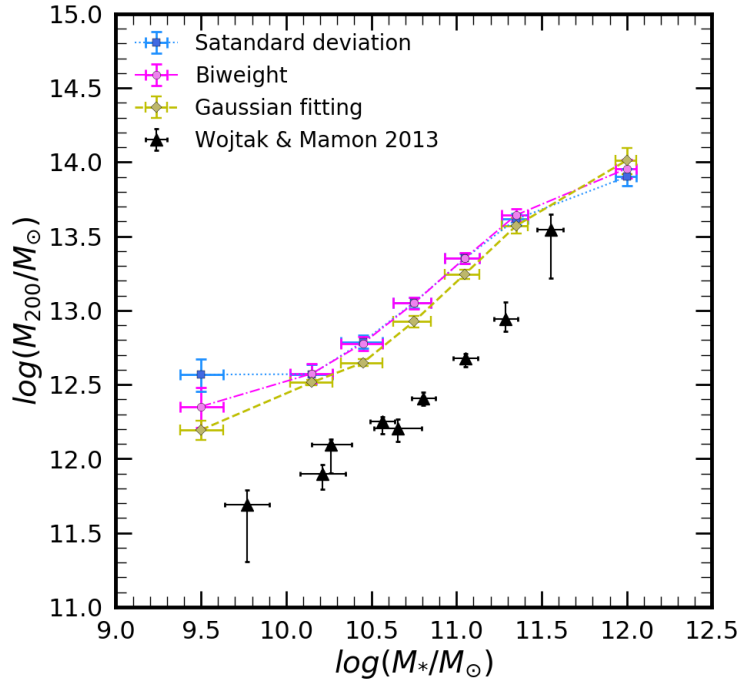
$$M_{200}[10^{14} \text{ M}_{\odot}] = 0.093 \times (\sigma_{\text{sat}}/200)^{2.90 \pm 0.15} . \quad (4.1)$$

그림 4.5는  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $M_{200}$ 으로 바꾸어 Wojtak & Mamon (2013) 결과와 비교한 항성 질량과 암흑 물질 헤일로 질량의 관계이다. 암흑 물질 헤일로의 질량이 클 수록 더 많은 물질을 끌어당겨 그로부터 별을 형성하기 때문에 큰 항성 질량을 가질 수 있다. 그러므로 본 연구 결과와 이전 연구 결과 모두 모은하의 항성 질량과 모은하의 암흑 물질 헤일로의 질량이 비례하는 결과를 보여준다.

본 연구에서 측정한  $M_{\text{Halo}}$ 가 이전의 연구보다 전체적으로 약 0.5dex정도 큰 질량으로 측정되었다. 우리는  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 통해  $M_{200}$ 을 측정 하였으나 Wojtak & Mamon (2013)는 위성 은하의 분포와 여러가지 모델링을 통하여 질량을 계산하였다. 두 결과의 차이가 나타나는 원인은  $M_{200}$ 의 값을 계산하는 방법의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 비례 관계의 영점 차이가 존재하나 항성 질량과 암흑 물질 헤일로의 질량이 비례하는 관계는 동일하게 나타난다. 결과적으로 은하의 항성 질량은 암흑 물질 헤일로의 질량을 추정할 수 있는 물리량임을 확인할 수 있다.

### 4.3 시뮬레이션 결과와의 비교

본 연구에서는  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 강한 선형 상관 관계를 3.5장에서 확인하였다. 관측을 통해 우리가 제시한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$  결과에 대해 Zahid et al. (2018)은 시뮬레이션 결과



**Figure 4.5.** 모든 모은하에 대한  $M_{200} - M_*$ 의 관계. 푸른색은 속보 분포의 표준 편차의 결과를 나타내며 (Danese et al. 1980), 자주색은 biweight (Beers et al. 1990), 황색은 가우시안 피팅의 결과를 보여준다. 검은색 삼각형은 Wojtak & Mamon (2013)에서 제시하는 항성 질량과 헤일로 질량의 관계를 보여주고 있다.

를 보여주고 있다. Zahid et al. (2018)의 그림 1(A)는 시뮬레이션을 통해 얻어진 헤일로의 암흑 물질 입자들의 속도 분산과 암흑 물질 헤일로의 질량이 비례하는 관계를 보여주고 있다. 그림 1(B)에서는 헤일로에 포함된 별들의 속도 분산과 암흑 물질 입자들의 속도 분산이 비례하는 모습을 보여준다. 이 두 결과를 종합하면 시뮬레이션을 통해 헤일로의 별 속도 분산과 질량이 비례한다는 사실을 알 수 있다 (그림 2).

우리는 암흑 물질 헤일로의 모든 성분을 관측을 통해 측정할 수 없다. 시뮬레이션에서는 암흑 물질 입자들의 속도 분산과 헤일로의 질량을 다음과 같은 식으로 제시하고 있다

$$\log \left( \frac{\sigma_{T,DM}}{100 \text{ km s}^{-1}} \right) = \alpha_1 + \beta_1 \log \left( \frac{M_{DM}}{10^{12} M_{\odot}} \right) . \quad (4.2)$$

관계를 잘 표현하는 상수의 값은  $\alpha_1 = -0.007 \pm 0.001$ ,  $\beta_1 = 0.300 \pm 0.001$  로 제시하고

있다. 실제 관측을 통해 암흑 물질의 속도 분산을 측정할 수 없다. 우리는 관측된 위성 은하가 모은하의 암흑 물질 헤일로 내에 위치함을 3.2에서 살펴보았다. 따라서 우리는 시뮬레이션에서의 암흑 물질 입자를 관측된 위성 은하로 치환하여 분석에 사용한다.

$\sigma_{T,DM}$ 은 시뮬레이션에서 얻어진 물리량으로 다음과 같이 정의된다

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}{3}}. \quad (4.3)$$

우리는 관측을 통해 위성 은하들의 시선 방향 속도 분산을 얻었다. 시뮬레이션에서 이용된 3차원 속도 분산으로 변환하기 위해 우리는 위성 은하의 속도 분포가 등방적이라고 가정하였다. 이 경우 관측적으로 측정한 우리의  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $\sigma_T$ 와 동일하게 치환할 수 있다.

Zahid et al. (2018)은 그림 5(B)에서 관측을 통해 얻은 시선 방향의 별 속도 분산과 암흑 물질 헤일로의 상관 관계를 보여주고 있다. 시뮬레이션의 결과를 표현한 수식은 다음과 같다

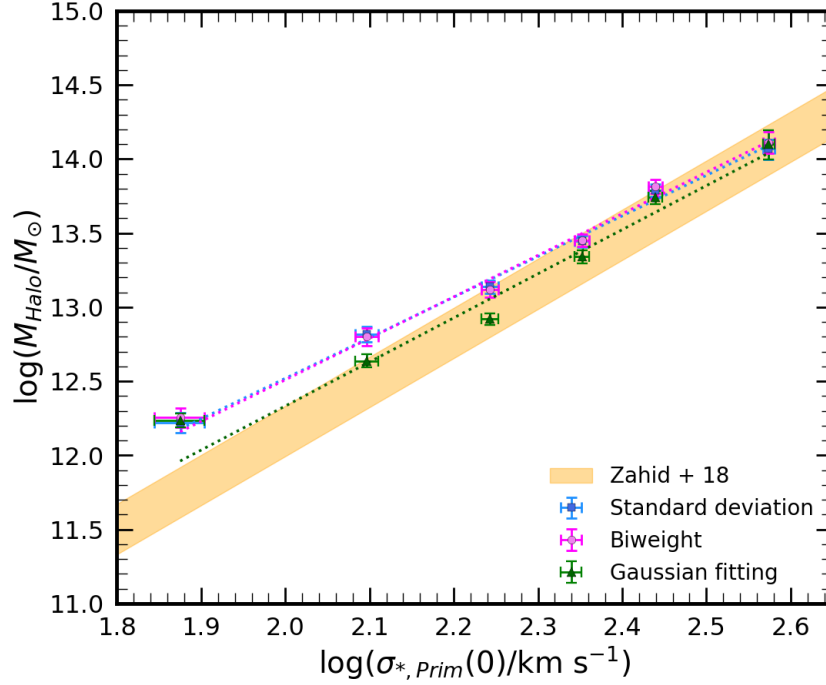
$$\log\left(\frac{M_{DM}}{10^{12} M_\odot}\right) = \alpha_6 + \beta_6 \log\left(\frac{\sigma_{h,*}}{100 \text{ km s}^{-1}}\right). \quad (4.4)$$

가장 잘 맞는 상수의 값은  $\alpha_6 = 0.16 \pm 0.03$ ,  $\beta_6 = 3.31 \pm 0.10$ 으로 제시하고 있다. 오차의 RMS 값은 0.17 dex로 제시되었다. 우리는 시뮬레이션의 결과를 통해  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $M_{DM}$ 으로 변환한 후 살펴본  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와의 관계를 식 4.4를 이용하여 비교하였다.

#### 4.3.1 모든 모은하 표본을 사용한 역학적 질량과 중심 속도 분산의 관계

모든 모은하 표본을 사용하여 살펴본  $\sigma_{\text{sat}}$ 와  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 의 관계를 (그림 3.16)  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $M_{Halo}$ 로 변환한 결과는 그림 4.6에서 보여주고 있다.

$\sigma_{\text{sat}}$ 로 부터 얻어진 세 가지의  $M_{Halo}$ 모두  $\log(\sigma_{*, \text{Prim}}(0)/\text{km s}^{-1}) > 2.2 \text{ km s}^{-1}$ 인 범위에서 *illustris* 시뮬레이션에서 제시하는 범위와 일치하는 결과를 보여준다. 자세하게 살펴보기 위해 각 방법에 대한 결과를 선형 함수 맞춤을 수행하였고, 그 결과는 표 4.1에 정리되어 있다.



**Figure 4.6.** 모든 중심 은하들에 대해 4.2식을 이용해  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 암흑 물질 헤일로 질량으로 변환한 결과. 주황색 영역은 Zahid et al. (2018)의 그림 5(B)에서 보여주는 은하의 별 속도 분산과 암흑 물질 헤일로 질량 범위를 나타낸다. 그림 3.16에 표기된 오차 범위를 변환하여  $M_{\text{Halo}}$ 의 최대, 최소 질량으로 범위를 표시하였다.

| $\log(M_{\text{DM}}/10^{12} M_{\odot}) = \alpha_{2,a} \times \log(\sigma_{*, \text{Prim}}/100 \text{ km s}^{-1}) + \beta_{2,a}$ |                 |                 |      |
|---|-----------------|-----------------|------|
| Method  | $\alpha_{2,a}$  | $\beta_{2,a}$   | RMS  |
| Standard Deviation  | $2.74 \pm 0.14$ | $7.05 \pm 0.33$ | 0.04 |
| Biweight  | $2.80 \pm 0.17$ | $6.91 \pm 0.40$ | 0.06 |
| Gaussian Fitting  | $2.97 \pm 0.35$ | $6.38 \pm 0.80$ | 0.13 |

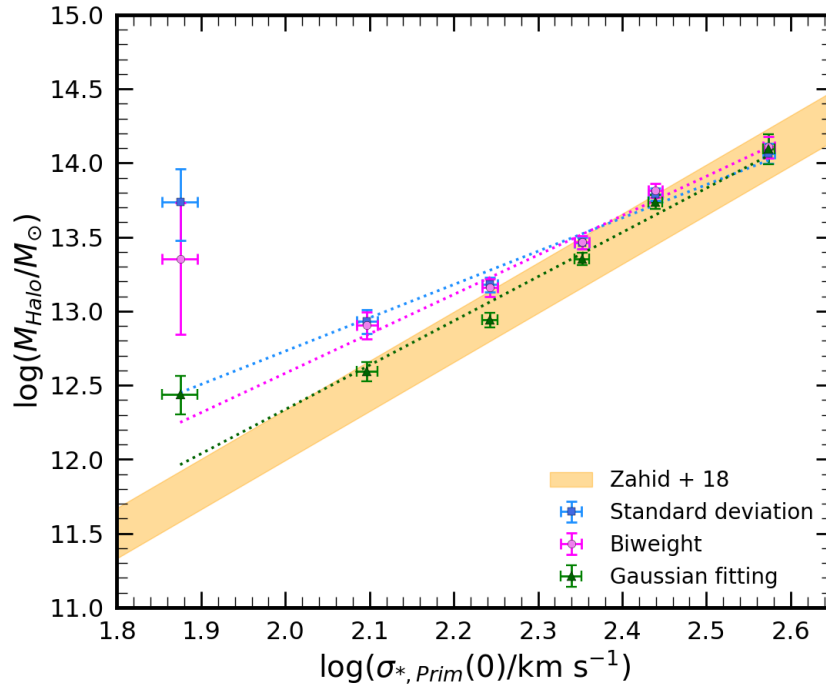
**Table 4.1.** 모든 모은하 표본에 대해  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와 변환한  $M_{\text{Halo}}$ 의 관계를 선형 함수에 맞춘 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 a는 모든 표본을 사용하였다는 뜻의 all을 나타낸다.

모든 모은하 표본을 사용한 결과  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 의 비례 관계는 오차 범위 내에서 동일한 기울기를 보여준다. 영점의 차이 또한 오차 범위 내에서 동일하게 나타나며, 함수와의 오차 RMS 값은 표준편차, biweight, 가우시안 맞춤 순으로 작게 나타났다. 시뮬레이션이 예측한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 의 관계 보다 본 연구에서 수행한 관측 자료 분석의 결과가 더 작은 기울기를 보여주고 있지만 전체적으로 유사한 비례 관계를 보이고 있다. 가장 큰 차이가 있는 부분은 모은하의 중심 속도 분산이 작은 경우이다. 관측으로 측정된  $M_{\text{Halo}}$ 가 시뮬레이션의 예측보다 약 0.5dex 정도 크게 측정되었다.  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 작은 모은하는 비리얼 정리에 의해 더 작은 질량을 가진다. 우리는 은하 표본을 선별하기 위해 적용한 속도 차이  $|\Delta v_{\text{los}}| < 1000 \text{ km s}^{-1}$ 의 조건을 적용하였다. 모은하의 질량이 작은 경우 위성 은하를 중력적으로 붙잡을 만큼 질량이 충분치 않아 중력적으로 상호작용을 하지 못할 수 있다. FoF로 은하 표본을 선별할 때 각 은하의 질량을 고려하지 않았기 때문에 질량이 작은 모은하의 경우 중력적으로 상호작용 하지 않으나 위성 은하로 선별되었을 가능성이 존재한다. 이러한 거짓 위성 은하들을 제거한다면  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 작게 측정될 것이며, 이를 식 4.2에 적용하면 더욱 작은  $M_{\text{Halo}}$ 를 가지게 될 것이다. 그 경우 시뮬레이션에서 예측한 범위와 관측의 결과가 더욱 유사해질 수 있다.

관측과 시뮬레이션의 결과에 작은 차이가 있으나 두 결과 모두  $M_{\text{Halo}}$ 가  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 에 비례한다는 사실을 보여주며, 상당부분 일치하는 결과를 나타낸다. 이는 본 연구에서 새롭게 제시한  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 암흑 물질 헤일로 질량  $M_{\text{Halo}}$ 를 추정하는데에 굉장히 유용한 물리량임을 뒷받침하는 강력한 근거이다.

#### 4.3.2 모은하 부 표본으로 살펴본 역학적 질량과 중심 속도 분산의 관계

Zahid et al. (2018)은 별 형성이 멈춘 은하 (quiescent galaxy)에 대해서 모 은하의 중심 속도 분산과 암흑 물질 헤일로의 질량이 비례한다는 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션을 통한 결과이기 때문에  $D_n4000$ 과  $(g - r)_0$ 과 같은 모은하 분류에 대한 조건이 제시되어 있지 않다. 따라서 우리가 선별한 모은하 표본들에 대해 각각 결과를 비교해보고자 한다.

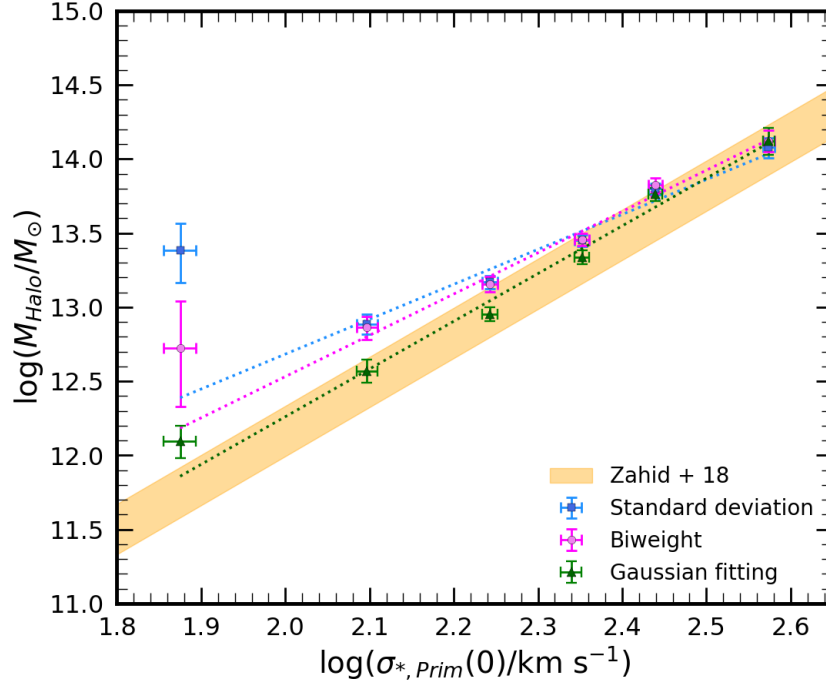


**Figure 4.7.** 적색 모은하 부표본에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과.

| $\log(M_{DM}/10^{12} M_{\odot}) = \alpha_{2,r} \times \log(\sigma_{*, \text{Prim}}/100 \text{ km s}^{-1}) + \beta_{2,r}$ |                 |                 |      |
|--|-----------------|-----------------|------|
| Method   | $\alpha_{2,r}$  | $\beta_{2,r}$   | RMS  |
| Standard Deviation   | $2.25 \pm 0.53$ | $8.24 \pm 1.26$ | 0.53 |
| Biweight   | $2.66 \pm 0.34$ | $7.26 \pm 0.81$ | 0.45 |
| Gaussian Fitting   | $2.99 \pm 0.39$ | $6.36 \pm 0.91$ | 0.20 |

**Table 4.2.** 별 형성이 멈춘 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 r는 적색 모은하 표본 사용하였다는 뜻의 red를 나타낸다.

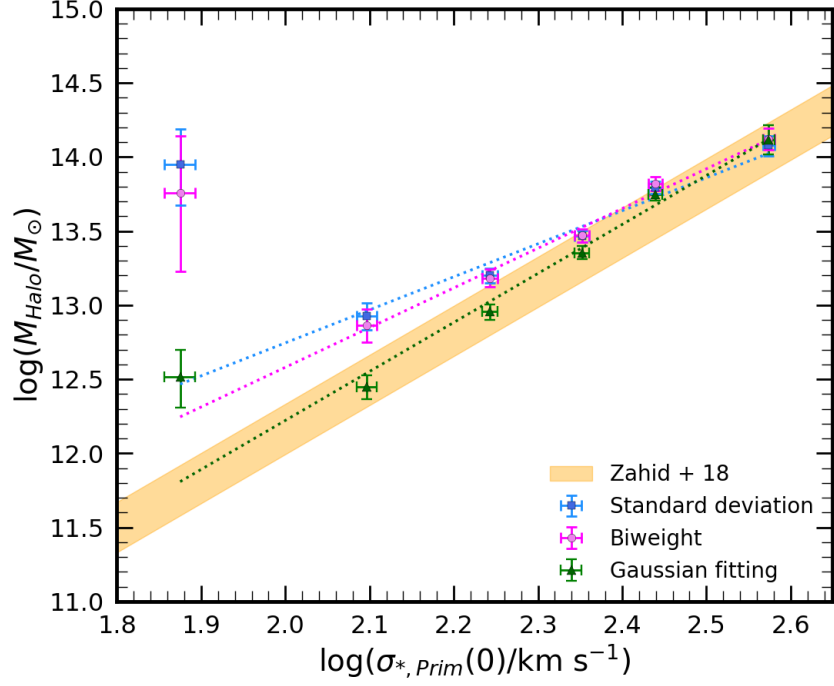




**Figure 4.8.** 별 형성이 멈춘 모은하들에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과.

| $\log (M_{DM}/10^{12} M_{\odot}) = \alpha_{2,q} \times \log (\sigma_{*, \text{ Prim}}/100 \text{ kms}^{-1}) + \beta_{2,q}$ |                 |                 |      |
|--|-----------------|-----------------|------|
| Method   | $\alpha_{2,q}$  | $\beta_{2,q}$   | RMS  |
| Standard Deviation   | $2.35 \pm 0.47$ | $7.97 \pm 1.09$ | 0.41 |
| Biweight   | $2.78 \pm 0.26$ | $6.96 \pm 0.60$ | 0.23 |
| Gaussian Fitting   | $3.22 \pm 0.27$ | $5.82 \pm 0.63$ | 0.11 |

**Table 4.3.** 별 형성이 멈춘 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상 수 아래 첨자에 위치한 q는 별 형성이 멈춘 모은하 표본 ( $D_n 4000 \geq 1.6$ )을 사용하였다는 뜻의 quiescent을 나타낸다.



**Figure 4.9.** 별 형성이 멈춘 적색 모은하들에 대해 그림4.6과 동일한 분석을 수행한 결과.

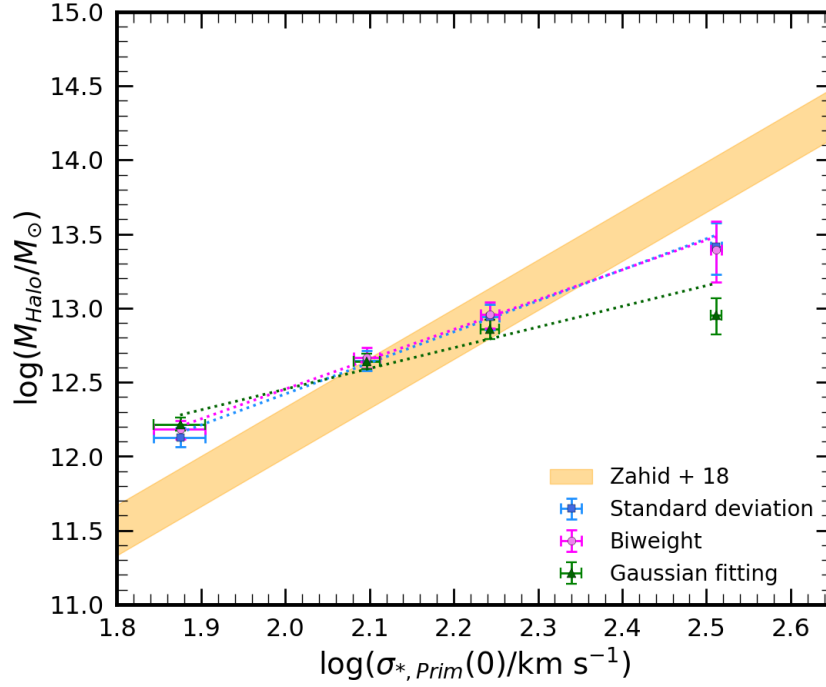
| $\log (M_{DM}/10^{12} \text{ M}_{\odot}) = \alpha_{2,r\&q} \times \log (\sigma_{*, \text{ Prim}}/100 \text{ kms}^{-1}) + \beta_{2,r\&q}$ |                   |                  |      |
|--|-------------------|------------------|------|
| Method   | $\alpha_{2,r\&q}$ | $\beta_{2,r\&q}$ | RMS  |
| Standard Deviation   | $2.23 \pm 0.59$   | $8.29 \pm 1.39$  | 0.61 |
| Biweight   | $2.68 \pm 0.42$   | $7.22 \pm 0.99$  | 0.62 |
| Gaussian Fitting   | $3.31 \pm 0.41$   | $5.61 \pm 0.97$  | 0.29 |

**Table 4.4.** 별 형성이 멈춘 적색 모은하 부표본에 대해 표4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 r&q는 별 형성이 멈춘 적색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 red & quiescent을 나타낸다.

그림 4.7, 4.8, 4.9는 각각 적색 모은하, 별 형성이 멈춘 모은하, 별 형성이 멈춘 적색 모은하 표본에 대해 그림 4.6와 동일한 분석을 수행한 결과이다. 선형 함수에 맞춤의 결과는 각각 표 4.2, 4.3, 4.4에 정리되어있다.

세 가지의 부 샘플 모두  $\log(\sigma_{*, \text{Prim}}(0)/\text{km s}^{-1}) > 2.2$  인 구간에서는 시뮬레이션의 예측과 관측으로 측정한 결과가 굉장히 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다. 모든 모은하 표본을 사용한 분석과 마찬가지로  $\log(\sigma_{*, \text{Prim}}(0)/\text{km s}^{-1}) \leq 2.2$  일 때 시뮬레이션의 예측보다 큰 결과를 얻었다. 모 은하의 부 표본을 사용한 결과의 첫 번째 점은 표본의 숫자가 충분치 않아 선형 비례관계에서 크게 벗어난 것으로 보인다. 두 번째 점인  $\log(\sigma_{*, \text{Prim}}(0)/\text{km s}^{-1}) \approx 2.2$  일 때는 위성 은하의 수가 180-300개 정도이므로, (표 2.1) 충분한 숫자의 표본이 확보되었다고 판단할 수 있다. 4.3.1장에서 살펴본바와 같이  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 작은 경우 모은하의 질량이 작아 상호작용 하지 못하는 위성 은하가 포함되었을 수 있다. 이 경우  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 크게 측정되었을 가능성이 있다.

또 다른 원인은 4.2식을 이용하기 위해 가정한  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 등방성이다.  $\sigma_{\text{sat}}$ 는 시선 방향으로 관측된 모은하와 위성 은하의 속도를 이용하여 얻은 시선 방향의 속도 분산이다. Zahid et al. (2018)은 3차원 속도 분산을 이용해  $\sigma_T$ 를 정의하였고,  $\sigma_T$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 사이의 관계를 제시하였다. 위성 은하의 속도 분포가 등방적이라는 가정을 통해 우리는  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $\sigma_T$ 로 치환할 수 있었다. 만약 위성 은하의 속도 분포가 등방적인 분포가 아니라면  $\sigma_{\text{sat}}$ 와  $\sigma_T$ 의 차이가 있을 수 있고, 그로인해  $M_{\text{Halo}}$ 의 범위가 달라질 수 있다. Wojtak & Mamon (2013)은 모은하의 항성 질량과 헤일로 질량의 상관관계 뿐만 아니라 위성 은하의 궤도에 대한 연구 결과도 제시하고 있다. Wojtak & Mamon (2013)의 그림 11.에는 적색 모은하의 경우 방사상으로 편향되어 있음 (radially biased)을 보여주고 있으며, 청색 모은하의 경우도 약하지만 위성 은하의 궤도가 등방적이지 않음을 보여준다. 본 연구에서 사용된 위성 은하들의 궤도가 비 등방적이라면, 시뮬레이션의 결과에 우리가 얻은  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 적용하여 암흑 물질 헤일로의 질량을 계산할 수 없다. 외부 은하의 3차원 궤도 성분을 파악하기는 매우 어렵지만, 위성 은하의 궤도 성분을 파악할 수 있다면 시뮬레이션과 관측치의 차이를 개선시킬 수 있을 것으로 보인다.



**Figure 4.10.** 청색 모은하들에 대해 그림 4.6과 동일한 분석을 수행한 결과.

| $\log(M_{DM}/10^{12} M_{\odot}) = \alpha_{2,b} \times \log(\sigma_{*, \text{Prim}}/100 \text{ km s}^{-1}) + \beta_{2,b}$ |                 |                 |      |
|--|-----------------|-----------------|------|
| Method   | $\alpha_{2,b}$  | $\beta_{2,b}$   | RMS  |
| Standard Deviation   | $2.09 \pm 0.12$ | $8.23 \pm 0.26$ | 0.04 |
| Biweight   | $2.01 \pm 0.11$ | $8.43 \pm 0.23$ | 0.04 |
| Gaussian Fitting   | $1.40 \pm 0.31$ | $9.66 \pm 0.65$ | 0.12 |

**Table 4.5.** 청색 모은하 부표본에 대해 표 4.1과 동일한 분석을 수행한 결과. 상수 아래 첨자에 위치한 b는 청색 모은하 표본을 사용하였다는 뜻의 blue을 나타낸다.

마지막으로 우리는  $(g - r)_0 \leq 0.85$ 인 청색 모은하 표본에 대한 분석을 수행하였다. 그림 3.15는 Zahid et al. (2018)의 결과와 청색 모은하 표본을 이용하여 얻은  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 의 관계를 보여주고 있으며, 표 4.5는 각 결과에 대한 선형 함수 맞춤의 결과를 보여준다. 청색 모은하 표본들에 대한 결과도 역시  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 가 선형으로 비례하는 결과를 보여주고 있다. 위에서 살펴본 모은하 부 표본들의 결과와는 달리 두 물리량의 비례 관계가 상대적으로 약한 것을 확인할 수 있다. Zahid et al. (2018)은 별 형성이 멈춘 은하에 대한 관계를 보여주고 있기 때문에 청색 모은하의 경우 직접 비교가 어렵다. 위에 언급하였듯이 청색 모은하의 경우  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 를 사용하는데에 많은 주의가 필요하다. 본 연구에서는 청색 모은하의  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가  $\sigma_{\text{sat}}$  그리고  $M_{\text{Halo}}$ 와도 좋은 상관관계를 가질 수 있음을 보여주었다. 하지만  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ - $\sigma_{\text{sat}}$ ,  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ - $M_{\text{Halo}}$ 의 비례 관계에 대한 물리적 의미를 알기 위해서는 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

## Chapter 5

### 결론 및 요약

우리는 암흑 물질 헤일로 질량과 헤일로 중심에 위치한 은하의 속도 분산과의 상관 관계를 조사하였다. 이를 위해 SDSS DR12 관측 자료로부터 아주 밝은 모은하와 그를 둘러싼 어두운 위성 은하로 구성된 은하 표본을 선별하였다. 은하 표본 선별을 위하여 우리는 Friends-of-Friends 알고리즘을 이용하였다. 선별된 위성 은하들이 관측적으로 특정한 경향성이 있는지를 확인하기 위해 중심 은하를 기준으로 분광 관측의 완결성을 확인하였다. 중심 은하로부터의 각거리, 중심 은하의 적색 이동과 겉보기 등급 세가지 조건에 대해 선별된 위성 은하가 특정 경향성 없이 균일하게 선별되었음을 알 수 있었다.

모은하의  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 를 사용하기 위해 조기형 모은하들을 선별하였다. 만기형 은하의 경우  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 원반의 회전으로 인해 잘못 측정될 수 있고, 측정된다 하더라도 중심 팽대부에 대한 물리량으로 은하 전체를 대변할 수 없는 물리량이기 때문이다. 우리는  $D_n4000$ 과  $(g-r)_0$ 색 조건을 이용하여 다음과 같이 부 표본을 선별하였다.  $(g-r)_0 > 0.85$ 인 적색 모은하,  $D_n4000 \geq 1.6$ 인 별 형성이 멈춘 모은하, 두 조건을 모두 만족하는 별 형성이 멈춘 적색 모은하, 마지막으로 차이를 비교하기 위해  $(g-r)_0 \leq 0.85$ 인 청색 모은하 총 네 분류의 모은하 부표본을 선별하였다.

은하의 역학적 질량 즉, 암흑 물질 헤일로 질량을 대변할 수 있는 물리량을 알아내기 위해, 위성 은하의 시선 방향 속도 분산을 계산하였다. 관측된 위성 은하 표본들을 이용해

총 세가지 방법을 이용하여 위성 은하의 속도 분산을 계산하였다. 임의의 표본을 가정하고 시험해 보았을 때, 표본의 수가 충분히 많은 경우 세 방법 모두 참값에 가까운 속도 분산 값을 추정해내었다.

가장 먼저 모은하로부터의 위성 은하까지의 거리에 대해 위성 은하의 속도 분산  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 확인하였다. 위성 은하들이 암흑 물질 헤일로에 위치하고 있다면 속도 분산이 일정하게 유지될 것이며, 암흑 물질 헤일로를 벗어나게되면  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 값이 감소할 것이다. 위성 은하 표본이 가장 많이 분포하는 100kpc 까지는  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 유의미하게 증가하거나 감소하는 경향성을 보이지 않았다. 따라서 우리는 선별된 위성 은하 표본들이 모은하의 암흑 물질 헤일로의 물리량을 대변할 수 있다고 판단하였다.

암흑 물질 헤일로의 질량 ( $M_{\text{Halo}}$ )과 모은하의 물리량을 비교한 기존의 연구들과 비교하기 위해 본 연구에서는 모은하의 절대 등급과 항성 질량을 함께 분석에 사용하였다 (Norberg et al. 2008; Wojtak & Mamon 2013).

모은하의 절대 등급과 위성 은하의 속도 분산  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 살펴보았다. 본 연구에서는 각 부표본들에 대해 분석을 수행한 결과 모은하의 절대 등급  $M_r$ 이 -21등급보다 밝은 경우에 한하여  $M_r$ 과  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 비례하는 관계에 있음을 확인하였다. 청색 모은하 부표본도 약하기는 하지만 증가하는 경향성을 보여주었다. 은하의 절대등급과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계에 대해 이전의 연구들은 상이한 결론을 제시한다. 좋은 비례 관계를 보여주기도하며 (Norberg et al. 2008), 특정 구간에만 비례하거나 (van den Bosch et al. 2004), 비례 관계가 전혀 없는 경우도 있다 (Brainerd, & Specian 2003). 우리의 결과와 이전의 연구들을 종합하여볼 때, 은하의 역학적 질량을 추정하기 위해 절대 등급을 사용하는 것은 많은 주의가 필요하다고 볼 수 있다.

두 번째는 모은하의 항성 질량과  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계이다. 표본의 숫자가 적은 경우 큰 오차를 보여주지만 절대 등급과는 달리 모은하의 항성 질량은  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 좋은 비례관계를 보여주었다. 기존의 Wojtak & Mamon (2013)의 결과와 비교하기 위해 우리는 모든 모은하 표본을 활용해  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 헤일로 질량인  $M_{200}$ 으로 변환하여 비교해보았다 (Rines et al. 2013). 두 결과 모두 모은하의 항성 질량과 역학적 질량 ( $M_{200}$ )이 비례하는 관계를 보여주고 있다.

영점의 차이는  $M_{200}$ 을 구하는 방법의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 이를 통해 우리는 항성 질량을 통해 은하의 역학적 질량을 추정하는 기존의 연구 결과들을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 이와 관련되어 Conroy et al. (2009); Behroozi et al. (2010)는 항성 질량을 추정하는데에는 약 0.3dex 정도로 큰 오차가 존재함을 보여주었다.

본 연구에서는 항성 질량보다 측정 오차가 작은  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 를 은하의 역학적 질량을 추정하기 위한 물리량으로 제시하기 위하여  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 관계를 살펴보았다.  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 계산하는 방법에 따라 영점의 차이는 있지만 부 샘플에 대해 비례하는 정도는 오차범위 내에서 동일하였다. 표본의 수가 매우 적은 특정 결과값을 제외하면,  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 강한 선형 상관 관계에 있음을 확인할 수 있다. 또한 항성 질량에 비해  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 의 오차가 매우 작은것을 확인할 수 있다. 이는 기존 연구에서 제시한 중심 별 속도 분산의 경우 측정 오차가 0.03dex이므로, 이는 항성 질량 방법의 오차에 비해 매우 작다 (Fabricant et al. 2013; Zahid et al. 2016a,b).  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 가 강한 상관관계에 있다는 사실로부터  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 모은하의 역학적 질량을 추정하는데에 매우 유용한 물리량임을 알 수 있다.

시뮬레이션을 통해 모은하의 속도 분산과 암흑 물질 헤일로 질량의 관계를 보여준 이전 결과와 비교하기 위해 얻어진  $\sigma_{\text{sat}}$ 를  $M_{\text{Halo}}$ 로 바꾸어 비교해보았다 (Zahid et al. 2018).  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 의 관계를 비교해보았을 때,  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가  $150 \text{ km s}^{-1}$ 보다 큰 결과들은 모두 시뮬레이션에서 예측하는 범위와 잘 일치한다.  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 작은 경우 시뮬레이션보다  $M_{\text{Halo}}$ 가 크게 측정되었는데, 이에 대한 원인은 다음과 같이 추정할 수 있다. 모은하의 중력이 작아 실제로 상호작용하지 못하는 위성 은하가 포함되었을 수 있고, 위성 은하의 속도 분포가 등방적이지 않은 경우  $\sigma_{\text{sat}}$ 로 추정한  $M_{\text{Halo}}$ 의 값이 달라질 수 있다. 추가적인 연구를 수행한다면 두 가지 원인에서의 차이를 개선할 수 있을 것으로 보인다. 하지만 전체적인 결과의 분포를 살펴보면 충분히  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $M_{\text{Halo}}$ 가 선형 비례하는 관계를 보여주고 있으며, 이는 Zahid et al. (2018)의 시뮬레이션 결과와 비교할 수 있는 관측적 증거를 제시한다.

본 연구에서는 위와 같은 분석들을 통해 기존의 연구에서 제시한 물리량 (절대 등급, 항성 질량)과 암흑 물질 헤일로의 질량사이의 관계를  $\sigma_{\text{sat}}$ 를 통해 비교하였다. 그리고



$\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ 의 비례성을 확인하였고, 이를 통해  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 를 암흑 물질 헤일로 질량을 추정할 수 있는 새로운 물리량임을 보였다. 절대 등급과, 항성 질량은 은하의 측광에서 겪는 어려움이 있고, 물리량을 얻어내는 과정에서 이론적 모형에 대한 의존도가 존재한다. 하지만  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 는 분광 관측을 통해 은하에 대해 직접 측정할 수 있는 물리량이며,  $\sigma_{\text{sat}}$ 와 좋은 상관 관계를 보여주는 항성 질량에 비해 1/10 수준의 측정 오차를 가진다 (Conroy et al. 2009; Behroozi et al. 2010; Fabricant et al. 2013; Zahid et al. 2016a,b). 따라서 본 연구에서 보여준  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 와  $\sigma_{\text{sat}}$ ,  $M_{\text{Halo}}$ 의 관계를 통해 은하의 역학적 질량을 측정하는데에  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 가 매우 효율적인 물리량임을 알 수 있다. SDSS와 이후에 시행될 많은 분광 탐사 연구를 통해  $\sigma_{*, \text{Prim}}(0)$ 정보를 구할 수 있다면, 이를 이용하여 암흑 물질 헤일로 특성을 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

# Bibliography

- Alam, S., Albareti, F. D., Allende Prieto, C., et al. 2015, ApJS, 219, 12
- Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., et al. 2013, A&A, 558, A33
- Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., et al. 2018, AJ, 156, 123
- Barton, E., Geller, M., Ramella, M., Marzke, R. O., & da Costa, L. N. 1996, AJ, 112, 871
- Balogh, M. L., Morris, S. L., Yee, H. K. C., et al. 1999, ApJ, 527, 54.
- Beers, T. C., Flynn, K., & Gebhardt, K. 1990, AJ, 100, 32
- Behroozi, P. S., Conroy, C., & Wechsler, R. H. 2010, ApJ, 717, 379.
- Brainerd, T. G., & Specian, M. A. 2003, ApJ, 593, L7.
- Brainerd, T. G. 2004, arXiv e-prints , astro-ph/0409381.
- Bruzual A., G. 1983, ApJ, 273, 105.
- Cappellari, M., & Emsellem, E. 2004, PASP, 116, 138.
- Choi, Y.-Y., Han, D.-H., & Kim, S. S. 2010, Journal of Korean Astronomical Society, 43, 191
- Conroy, C., Gunn, J. E., & White, M. 2009, ApJ, 699, 486.

- Danese, L., de Zotti, G., & di Tullio, G. 1980, *A&A*, 82, 322
- Fabricant, D., Chilingarian, I., Hwang, H. S., et al. 2013, *PASP*, 125, 1362.
- Geller, M. J., Hwang, H. S., Fabricant, D. G., et al. 2014, *ApJS*, 213, 35.
- Huchra, J. P., & Geller, M. J. 1982, *ApJ*, 257, 423.
- Hwang, H. S., Elbaz, D., Lee, J. C., et al. 2010, *A&A*, 522, A33.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., et al. 2003, *MNRAS*, 341, 33.
- Lange, J. U., van den Bosch, F. C., Zentner, A. R., Wang, K., & Villarreal, A. S. 2019, *MNRAS*, 482, 4824
- Maraston, C., & Strömbäck, G. 2011, *MNRAS*, 418, 2785.
- McKay, T. A., Sheldon, E. S., Johnston, D., et al. 2002, *ApJ*, 571, L85.
- Mignoli, M., Cimatti, A., Zamorani, G., et al. 2005, *A&A*, 437, 883.
- Munari, E., Biviano, A., Borgani, S., Murante, G., & Fabjan, D. 2013, *MNRAS*, 430, 2638
- Norberg, P., Frenk, C. S., & Cole, S. 2008, *MNRAS*, 383, 646
- Park, C., & Hwang, H. S. 2009, *ApJ*, 699, 1595.
- Prada, F., Vitvitska, M., Klypin, A., et al. 2003, *ApJ*, 598, 260.
- Rines, K., Geller, M. J., Diaferio, A., et al. 2013, *ApJ*, 767, 15
- Robotham, A. S. G., Norberg, P., Driver, S. P., et al. 2011, *MNRAS*, 416, 2640.
- Sohn, J., Geller, M. J., Hwang, H. S., Zahid, H. J., & Lee, M. G. 2016, *ApJS*, 225, 23
- Sohn, J., Geller, M. J., Zahid, H. J., et al. 2017a, *ApJS*, 229, 20

- Sohn, J., Hwang, H. S., Geller, M. J., et al. 2015, *Journal of Korean Astronomical Society*, 48, 381.
- Sohn, J., Zahid, H. J., & Geller, M. J. 2017b, *ApJ*, 845, 73
- Tempel, E., Tago, E., & Liivamägi, L. J. 2012, *A&A*, 540, A106
- Tempel, E., Tamm, A., Gramann, M., et al. 2014, *A&A*, 566, A1.
- Thomas, D., Steele, O., Maraston, C., et al. 2013, *MNRAS*, 431, 1383
- van den Bosch, F. C., Norberg, P., Mo, H. J., et al. 2004, *MNRAS*, 352, 1302
- Vergani, D., Scodeggio, M., Pozzetti, L., et al. 2008, *A&A*, 487, 89.
- Watkins, L. L., Evans, N. W., & An, J. H. 2010, *MNRAS*, 406, 264.
- Woods, D. F., Geller, M. J., Kurtz, M. J., et al. 2010, *AJ*, 139, 1857.
- Wojtak, R., & Mamon, G. A. 2013, *MNRAS*, 428, 2407
- Zahid, H. J., Damjanov, I., Geller, M. J., et al. 2016, *ApJ*, 821, 101.
- Zahid, H. J., Geller, M. J., Fabricant, D. G., et al. 2016, *ApJ*, 832, 203.
- Zahid, H. J., Sohn, J., & Geller, M. J. 2018, *ApJ*, 859, 96
- Zaritsky, D., Smith, R., Frenk, C., & White, S. D. M. 1993, *ApJ*, 405, 464



# ABSTRACT

Most of the galaxy mass is known to be occupied by dark matter. However, it is difficult to directly measure the mass and distribution of dark matter in a galaxy. Recently, the velocity dispersion of the stellar population in a galaxy's center has been suggested as a possible probe of the mass of the dark matter halo. In this study, we test and verify this hypothesis using the kinematics of satellite galaxies. We calculate the dynamical mass of the primary galaxy from the velocity dispersion of their satellite galaxies. We then investigate the correlation between the dynamical mass and the central velocity dispersion of the primary galaxy. We use the Friends-of-Friends (FoF) algorithm to build a catalog of primary galaxies and their satellite galaxies from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) DR 12.

Due to the small number of satellites per primary, we stack the satellite galaxies belonging to primaries with similar physical properties (e.g. stellar mass, absolute magnitude, and central velocity dispersion) to increase the statistical reliability. The stellar velocity dispersion of the central host galaxy has a strong linear correlation with the velocity dispersion of their satellite galaxies. Also, the stellar velocity dispersion of the central galaxy is strongly correlated with the dynamical mass of the galaxy, which can be described as a power law. While previous studies have used the luminosity or stellar mass of primary galaxies, we confirm that the central velocity dispersion of the primary galaxy is a robust method to probe the mass of the dark matter halo. The results of this study show that the central velocity dispersion of the primary galaxy can be a good proxy for tracing the mass of dark matter halo. Through future spectroscopic surveys, we expect that the central velocity dispersion can be measured for a larger sample of galaxies, which will help explain the nature of the dark matter halo.

**Keywords:** dark matter halo, galaxies, galaxy kinematics, satellite galaxies

*Student Number:* 2017-27219

## 감 사 의 글

대학원 생활을 하며 과제와 시험으로 밤을 지샬때면 ‘어떻게든 끝이 나겠지.’라는 말을 버릇처럼 뱉곤 했습니다. 특히나 이번 학기는 정신 없이 시간을 보내며 시간이 부족하지 않을까라는 걱정이 많았지만, 좋은 방향으로 끝을 맺을 수 있어서 참 다행이라는 생각이 듭니다.

2017년 하반기부터 관악에서 보낸 2년의 시간은 연구라는 명분하에 더 많은 것들을 경험하며 배울 수 있었고, 새로이 만난 사람들과 함께 좋은 추억을 만들 수 있던 시간이었습니다. 가장 먼저 2년간 많은 가르침을 지도해주신 이명균 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 연구 속도가 느리다보니 좋은 결과가 나오기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 기간 동안 지켜봐주시고 많은 조언을 주신 덕분에 좋은 연구 결과로 석사 학위를 마무리할 수 있었습니다. 2년간 연구를 통해 주신 많은 가르침들 덕분에 연구 외에도 많은 도움이 되었습니다. 항상 늦은 시간에 스카이프를 도와주신 손주비 박사님께도 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 연구의 시작부터 마무리까지 좋은 피드백과 함께 부족한 부분을 개선할 수 있도록 매주 도움을 주신 덕분에 조금씩 발전할 수 있었습니다. 시차가 있어 매주 스카이프를 하기 어려웠을텐데 배려 해주신 덕분에 저에게 편한 시간대에 지도 받을 수 있었습니다.

지금은 졸업하신 선배님, 류진혁 박사님, 제가 처음 팀에 들어왔을 때, 연구 주제를 선정할 수 있도록 큰 도움을 주셔서 감사합니다. 학위 논문 피드백에 제가 걱정된다는 이야기를 적어주셨었는데 다행히 학위를 잘 끝냈다는 답장을 적을 수 있게되었습니다. 팀에서 서버관리부터 행정처리까지 가장 많은 일을 하시느라 바쁘신 지수 누나와 정환이 형. 디펜스 직전에 도움을 주신 덕분에 제 학위 논문의 결과들을 좋은 그림을 통해 보여줄 수 있었습니다. 처음 팀에 들어왔을 때에 적응할 수 있도록 많은 도움을 주었던 브라이언. 병역문제가 원활히 해결되어서 정말 다행스럽고 부럽습니다. 이번 학기 같은 연구실에서 연구에 대한 잦은 토의와 영어에 대해 큰 도움을 준 재연이에게도 고맙다는 말을 전합니다.



다음 학기 졸업 준비로 바쁠텐데 연구 일정 잘 계획해서 저처럼 마감 기한에 고생 하지 않기를 바랍니다. 화이팅. 연구를 시작하는 성아와 유정에게 많은 도움을 주지는 못했지만 저보다 더 좋은 연구 결과를 얻을 수 있기를 바랍니다. 만날 때마다 좋은 말씀을 해주시던 은총 선배부터 졸업하신 후에도 학교에 오셔서 도움을 주신 모든 팀 선배님들께도 감사드립니다. 팀원들이 서로 다른 주제를 연구하다보니 매 미팅때마다 제 연구 외에도 다양한 연구를 접할 수 있어서 굉장히 즐겁게 발표를 들을 수 있었습니다.

저희 팀원분들 외에 많은 다른 팀원 분들 덕분에 즐거운 대학원 생활이었습니다. 행정 문제와 바쁜 졸업 스케줄을 원활하게 처리할 수 있도록 도와주신 노현주 조교님, 첫 대학원 입학 때부터 뺏 속 깊은 조언을 주신 재진형, 파이썬과 이론적 내용에 대해 많은 가르침을 주신 윤수형과 호진이형, 학부 때부터 대학원까지 함께 긴 인연이 되어준 민철형과 소피아누나, 주연누나, 항상 연구의 원동력인 카페인을 준비해주는 상혁이형, 즐거운 분위기를 만들어주시는 종호형, 가끔 술 마시며 이야기나누는 겨레형, 볼 때마다 오랜만에 만나는 수현이. 동기 승학이 관측 하느라 바쁘고 힘들텐데 졸업 점수 꼭 채울 수 있길 바라. 연구 시작 단계에서 고민 많은 한결이도 얼른 좋은 결과가 있기를 바랄게. 그 외에 적지못한 모든 대학원 분들께도 감사하며, 앞으로도 항상 응원할게요.

첫 예상과는 달리 다사다난했지만 빠르게 2년이라는 시간이 지났습니다. 막연한 호기심에 시작했던 천문학을 공부하다보니 어느덧 석사 학위를 수여하게 되었네요. 석사 졸업을 앞둔 지금 마음 한편으로는 아쉬움이 남습니다. 그만큼 19동에서 지낸 시간들이 즐거웠고, 많은 성장을 할 수 있었기 때문입니다. 졸업 이후에 무엇을 하게될지는 모르지만 19동이 많이 그리울 것 같습니다. 다른 대학원 학생분들 모두 좋은 연구 결과와 함께 행복한 졸업길을 걸으실 수 있기를 기도합니다. 좋은 가르침을 주신 모든 교수님들과 대학원의 모든 분들께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 모두들 행복이 가득하시기를 바라며, 언제나 좋은 모습으로 인사드릴 수 있으면 좋겠습니다. 다시 한 번 감사합니다.

서강일 올림